

# **ESTUDO DO DESLIZAMENTO EM DESCONTINUIDADES COM RUGOSIDADE DEFINIDA – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO**

**DAVID FILIPE NETO ROCHA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA**

---

Orientador: Professor Doutor José Eduardo Tavares Quintanilha de  
Menezes

---

JULHO DE 2015

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



[miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



[feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

*“Crescendo e Aprendendo”*

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os docentes da faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em particular a José Eduardo Menezes, orientador da presente dissertação, pela partilha de conhecimento e disponibilidade apresentada para demonstrar qual o melhor caminho a seguir.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, seu corpo docente e administração, pelas excelentes condições e recursos que disponibiliza a todos os alunos, contribuindo diretamente para o melhor desempenho e desenvolvimento.

A Ivo, Luana, Soneca, Helena, Senane, Tiago, Vedgi, Margarida, Ju, Madeiras, amigos de faculdade de maior apreço, pelo apoio, companheirismo e disponibilidade. Miúdos, vocês são muito bons.

À minha namorada, pela sua presença, devoção e apoio incondicional. Fazes-me bem da melhor forma.

E por último, à minha família, em especial aos meus pais e irmãos por todos os ensinamentos que me transmitiram ao longo da minha vida. A vocês devo grande parte do que sou hoje, a vossa presença traçou um caminho que prioriza a honestidade e integridade, valores demais importantes na sociedade. Uma nova etapa é agora atingida graças ao vosso esforço, devoção e confiança em mim, obrigado António e Isabel.



## RESUMO

A presente dissertação tem como propósito o estudo do comportamento mecânico no deslizamento em juntas com rugosidade geometricamente definida e constituídas por material com características físicas e mecânicas conhecidas.

Para se efetuar o estudo mencionado, recorreu-se a um *software* de análise por elementos finitos e modelou-se um provete de acordo com as características físicas exigidas pela caixa de corte presente no laboratório da FEUP. A modelação do provete adotado simula o ensaio de resistência ao corte, tendo sido obtidos valores que caracterizam os modelos em diversas situações de carregamento.

O comportamento resistente das juntas ao deslizamento foi caracterizado por alguns autores, cujos critérios definidos são bastante aceites na atualidade para a definição do mesmo. Neste trabalho as juntas estudadas têm a rugosidade definida por um perfil em dente de serra. O critério de rotura a considerar neste caso pode ser o critério bilinear de Patton (1966). A rugosidade mínima corresponde a uma descontinuidade lisa (critério de Mohr-Coulomb). Ao longo deste estudo, os resultados obtidos são comparados com estes dois critérios que definem o comportamento mecânico de uma determinada descontinuidade.

A modelação efetuada contempla a análise de uma descontinuidade lisa e de 20 descontinuidades com diferentes geometrias. As 20 juntas diferem geometricamente no número de saliências e na sua inclinação. Assim sendo, no decorrer das análises quantificou-se a influência dessas alterações geométricas na resistência ao deslizamento das descontinuidades.

Os resultados obtidos com a modelação numérica foram confirmados pelas teorias anteriormente mencionadas, verificando-se esta conformidade quer para a descontinuidade lisa, quer para a descontinuidade com saliências.

Foi também efetuado um breve estudo tridimensional considerando a orientação das asperezas oblíqua relativamente ao plano de corte, ou seja, fez-se variar o ângulo de orientação das saliências na direção transversal aos planos modelados. Por forma a compreender a influência deste fator na resistência ao deslizamento, consideraram-se 4 ângulos diferentes de orientação das asperezas.

Com este trabalho, compreende-se que a simulação numérica de ensaios de resistência ao corte executados em laboratório ou *in situ* são uma mais-valia para se prever o comportamento em termos de resistência e deformação. Com a criação de suportes numéricos será possível não só a previsão do comportamento mecânico no decorrer do ensaio, mas também testar a sua qualidade de execução e detetar eventuais erros.

PALAVRAS-CHAVE: juntas rochosas, rugosidade, ensaios de deslizamento, cálculo automático.



## **ABSTRACT**

The purpose of the following dissertation is to study the mechanical behavior in the slippage of rough joints geometrically defined and composed by a material that has well-known physical and mechanical features.

In order to achieve the following study a software analysis by finite elements was used and also a sample shaped according to the physical characteristics demanded by the cut box present in FEUP's lab. The modeling of the sample adopted simulates the shear strength testing, hereby obtaining values which characterize the model in several loading situations.

The resisting behavior of the joints to the slipping has been characterized by some authors, whose defining criteria are in our days commonly accepted to establish it. In this work an approach of the Mohr-Coulomb criteria for smooth discontinuities and Patton's bilinear criteria (1966), which consider the saw tooth roughness of the joints, has been carried out. Throughout this work, the goals achieved are compared to these two criteria which define the mechanical behavior of a certain discontinuity.

The shaping that was carried out covers the analysis of the smooth discontinuity and also of twenty more discontinuities with different geometries. That said, during the analysis the influence of these geometrical alterations was quantified in the resistance to the sliding of discontinuities.

The results achieved with the numeric modeling were confirmed by the theories mentioned above, verifying the compliance in the smooth discontinuity, as well as in the discontinuity with bumps.

A brief tridimensional study was accomplished taking into consideration the orientation of the oblique harshness regarding the cut plan, in other words, the orientation angle of the bumps is in the transversal direction of the modelled plans. In order to understand the influence of this factor in the resistance to the slipping process, four different orientation roughness angles were considered.

Through this work, it is understood that the numeric simulation of rehearsals of the cut resistance performed either in a lab or "in situ" are a plus when predicting the behavior in terms of resistance and deformity. With the creation of numeric structures, not only will there be possible to predict mechanical behavior in the process of testing, but also to test the execution plan and detect potential errors.

**KEYWORDS:** rock joints, roughness, slipping tests, automatic calculation.





## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO .....	2

<b>2. DESCONTINUIDADES .....</b>	<b>5</b>
2.1 ASPETOS GERAIS .....	5
2.2 TIPOS DE DESCONTINUIDADES .....	6
2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES .....	7
2.3.1 ORIENTAÇÃO .....	9
2.3.2 ESPAÇAMENTO .....	10
2.3.3 RUGOSIDADE .....	10
2.3.4 NÚMERO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES .....	12
2.4 RESISTÊNCIA DAS DESCONTINUIDADES .....	13
2.4.1 CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB .....	14
2.4.2 CRITÉRIO DE PATTON .....	16
2.4.3 CRITÉRIO DE BARTON E CHOUBEY .....	18
2.4.3.1 Coeficiente de rugosidade da descontinuidade, JRC .....	18
2.4.3.2 Resistência à compressão das paredes da junta, JCS .....	21
2.4.3.3 Ângulo de atrito residual, $\phi_r$ .....	21
2.4.4 ESTIMATIVA DO ÂNGULO DE ATRITO, $\phi_b$ .....	22
2.4.5 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	23
2.4.6 EFEITO DA ORIENTAÇÃO DAS ASPEREZAS NA RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DAS DESCONTINUIDADES .....	25

<b>3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE E DESLIZAMENTO .....</b>	<b>31</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	31

<b>3.2 ENSAIOS <i>IN SITU</i></b>	32
<b>3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS</b>	35
<b>3.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE</b>	38
<b>3.5 ENSAIOS DE CORTE E DESLIZAMENTO DE JUNTAS DA FEUP</b>	41
3.5.1 EQUIPAMENTO	41
3.5.2 ENSAIOS	42
 <b>4. MODELOS NUMÉRICOS</b>	 45
<b>4.1 INTRODUÇÃO</b>	45
4.1.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	45
4.1.2 PROGRAMA PHASE 2	46
<b>4.2 APRESENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GERAL DO MODELO EM PHASE2</b>	47
4.2.1 DEFINIÇÕES DO PROJETO	47
4.2.2 GEOMETRIA	48
4.2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	49
4.2.4 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	50
4.2.5 CONDIÇÕES FRONTEIRA	50
<b>4.3 JUNTA LISA</b>	50
<b>4.4 JUNTAS COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO NORMAL AO PLANO DE CORTE</b>	51
<b>4.5 JUNTAS COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO OBLÍQUA AO PLANO DE CORTE</b>	57
 <b>5. ANÁLISE PARAMÉTRICA</b>	 61
<b>5.1 ASPETOS GERAIS</b>	61
<b>5.2 JUNTA LISA</b>	62
<b>5.3 JUNTAS COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO PERPENDICULAR AO PLANO DE CORTE</b>	64
5.3.1 ENVOLVENTES DE ROTURA	64
5.3.2 CASO DE OCORRÊNCIA DE DILATÂNCIA ( $\sigma_n=0.5$ MPA)	71
5.3.3 CASO DE OCORRÊNCIA DE CORTE E DILATÂNCIA ( $\sigma_n=2$ MPA)	74
5.3.4 CÁLCULO DE SRF PARA $\sigma_n=0.1$ MPA E $T=0.3$ MPA	76
<b>5.4 JUNTAS COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO OBLÍQUA AO PLANO DE CORTE</b>	79
5.4.1 CÁLCULO DE SRF PARA DIFERENTES VALORES DE INCLINAÇÃO DAS ASPEREZAS, $\theta$	80
5.4.2 SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE PARA $\sigma_n=0.5$ MPA E $\sigma_n=2$ MPA	81

<b>6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> ....	85
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	85
6.2 LIMITAÇÕES DA INVESTIGAÇÃO .....	86
6.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	87
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	 89
 <b>ANEXOS</b> .....	 91



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação da transição entre a matriz rochosa e o maciço rochoso (González de Vallejo, 2002).....	5
Figura 2.2 - Representação dos parâmetros de caracterização das descontinuidades (Hudson & Harrison, 2007).....	8
Figura 2.3 - Ilustração do efeito desfavorável da orientação (González de Vallejo, 2002). ....	9
Figura 2.4 - Definição da orientação de descontinuidades (González de Vallejo, 2002). ....	10
Figura 2.5 - Representação do espaçamento de descontinuidades (ISRM, 1977). ....	10
Figura 2.6 - Tipos de escalas e respetivos ensaios para definição da rugosidade e ondulação (ISRM, 1977). ....	11
Figura 2.7 - Perfis de rugosidade típicos considerando as duas escalas (ISRM, 1977). ....	12
Figura 2.8 - Representação do número famílias de descontinuidades (González de Vallejo, 2002)...	13
Figura 2.9 - Representação gráfica da relação tensão normal-tensão de corte para dois maciços rochosos e três tipos de descontinuidades (Neyra, 2006). ....	14
Figura 2.10 - Representação do comportamento de descontinuidades lisas no ensaio de corte ou deslizamento (Evert Hoek, 2000). ....	15
Figura 2.11 - Representação da geometria de alguns dos provetes de gesso utilizados por Patton (Patton, 1966).....	16
Figura 2.12 - Representação gráfica Tensão-Deslocamento tangencial para descontinuidades com rugosidade; Representação do critério bi-linear de Patton (González de Vallejo, 2002). ....	17
Figura 2.13 - Tabela com os valores de JRC para cada perfil tipo (N. Barton & Choubey, 1977). ....	19
Figura 2.14 - Representação do ensaio <i>tilt test</i> ; a-base; b-parte superior móvel; c-parte inferior fixa; $\alpha$ -ângulo com a horizontal para o qual ocorre deslizamento (N. Barton & Choubey, 1977). ....	20
Figura 2.15 - Ábaco para estimar o valor de JRC em função da amplitude e do comprimento do perfil (Barton & Bandis, 1982). ....	21
Figura 2.16 - Esquema representativo do ensaio de carga pontual (González de Vallejo, 2002). ....	24
Figura 2.17 - Ábaco para estimativa da resistência à compressão uniaxial a partir da resistência do martelo de Schmidt (Bray & Hoek, 1981). ....	25
Figura 2.18 - Representação tridimensional da orientação das asperezas (Khosravi et al., 2013). ....	26
Figura 2.19 - a) Carregamento perpendicular à orientação das asperezas ( $\theta=0$ ); b) Carregamento oblíquo à orientação das asperezas ( $\theta\neq 0$ ). ....	27
Figura 2.20 - Resultados dos ensaios sob tensão normal constante de 140 KPa (Khosravi et al., 2013). ....	27
Figura 2.21 - Resultados das tensões tangenciais de pico num gráfico tensão tangencial - tensão normal para inclinação das saliências igual a 15°. ....	28
Figura 2.22 - Resultados das tensões tangenciais de pico num gráfico tensão tangencial - tensão normal para inclinação das saliências igual a 30°. ....	28

Figura 2.23 - Representação da direção do movimento para asperezas com ângulo de orientação das saliências diferente de zero (Khosravi et al., 2013). ....	29
Figura 3.1 - Configuração do ensaio de resistência ao corte (Brady & Brown, 2004). ....	32
Figura 3.2 - Esquema representativo do ensaio da máquina fixa de resistência ao corte <i>in situ</i> (ISRM, 1974a).....	33
Figura 3.3 - Esquema representativo dos elementos que compõem a máquina de resistência ao corte portátil (Evert Hoek & Bray, 1999). ....	34
Figura 3.4 - Máquina de resistência ao corte portátil. (Ross-Brown & Walton, 1975) .....	35
Figura 3.5 - Representação dos métodos de obtenção de amostras para o ensaio de resistência ao corte. (a)-extração de uma amostra; (b) - moldagem de uma descontinuidade; (c) - amostra com a descontinuidade moldada em gesso ou em cimento (Goodman, 1989). ....	36
Figura 3.6 - Esquema representativo da caixa de corte para o ensaio laboratorial (ISRM, 1974b). ....	36
Figura 3.7 - Esquema representativo da máquina de ensaio laboratorial de resistência ao corte direto (Evert Hoek, 2000). ....	38
Figura 3.8 - Máquina de ensaio laboratorial de resistência ao corte (Evert Hoek, 2000). ....	38
Figura 3.9 - Curvas de tensão tangencial-deslocamento tangencial para vários materiais sobre tensão normal constante igual a 1.0 MPa (E. Hoek & Brown, 1997). ....	39
Figura 3.10 - Esquema da obtenção de uma curva de tensão tangencial-tensão normal com base em 3 ensaios de resistência ao corte. ....	40
Figura 3.11 - Gráficos tensão-deslocamento tangencial (curva contínua) e dilatância-deslocamento tangencial (curva tracejado) para uma descontinuidade com rugosidade sob tensão normal constante igual a 1.5 Mpa (E. Hoek & Brown, 1997). ....	41
Figura 3.12 - Caixa de corte do equipamento de laboratório de ensaio de resistência ao corte da FEUP (Menezes, 2006) . ....	42
Figura 3.13 - Provete com rugosidade “dente de serra” submetido ao ensaio de resistência ao corte (Dumbliauskaite, 2006). ....	43
Figura 4.1 - Representação da geometria do modelo em estudo. ....	48
Figura 4.2 - Representação do modelo da caixa de corte com o modelo de junta lisa em Phase2. ....	51
Figura 4.3 - Elementos geométricos das descontinuidades consideradas. ....	52
Tabela 4.4 - Parâmetros dos critérios de rotura obtidos com recurso ao <i>Roclab</i> . ....	54
Figura 4.4 - Representação das envolventes de rotura para os critérios de Hoek Brown e Mohr Coulomb. ....	54
Figura 4.5 - Esquema representativo da orientação das duas famílias de descontinuidades. ....	54
Figura 4.6 - Representação da introdução das características das duas famílias de descontinuidades no <i>software</i> para $i=10^\circ$ e $n=4$ . ....	55
Figura 4.7 - Representação das duas modelações possíveis para a mesma descontinuidade: a) definição das coordenadas geométricas dos vértices; b) criação de duas famílias de descontinuidades. ....	56

Figura 4.8 - Translação de $\Delta l/2$ (junta simétrica). .....	56
Figura 4.9 - a) Rugosidade com orientação perpendicular ao plano de corte; b) Rugosidade com orientação oblíqua relativamente ao plano de corte. ....	57
Figura 4.10 - Processo de cálculo do ângulo $\alpha$ apresentado na vista de frente. ....	58
Figura 5.1 - Gráficos tensão de corte ( $\tau$ )—deslocamento horizontal obtidos com recurso ao Phase2 para cada valor de tensão normal ( $\sigma_n$ ) constante. ....	63
Figura 5.2 - Gráfico comparativo de resultados obtidos com recurso à modelação e a envolvente teórica de Mohr-Coulomb. ....	63
Figura 5.3. - Representação esquemática da bilinearidade de Patton, equações que definem a envolvente. ....	64
Figura 5.4 - Gráfico Tensão tangencial $\tau$ —Tensão normal $\sigma_n$ , obtidos na modelação para os diferentes números de saliências com $i=20^\circ$ . ....	65
Figura 5.5 - Gráfico Tensão tangencial $\tau$ —Tensão normal $\sigma_n$ obtidos na modelação para os diferentes números de saliências com $i=15^\circ$ . ....	66
Figura 5.6 - Gráfico Tensão tangencial $\tau$ —Tensão normal $\sigma_n$ obtidos na modelação para os diferentes números de saliências com $i=10^\circ$ . ....	66
Figura 5.7 - Gráfico Tensão tangencial $\tau$ —Tensão normal $\sigma_n$ obtidos na modelação para os diferentes números de saliências com $i=5^\circ$ . ....	67
Figura 5.8 - Valores de tensão normal obtidos na modelação que separam a ocorrência de dilatância e corte em função dos valores de inclinação. ....	68
Figura 5. 9 - Comparação entre as envolventes de rotura teórica e a obtida na modelação para $i=20^\circ$ ; $n=20$ . ....	69
Figura 5.10 - Comparação entre as envolventes de rotura teórica e a obtida na modelação para $i=20^\circ$ ; $n=15$ . ....	69
Figura 5.11 - Comparação entre as envolventes de rotura teórica e a obtida na modelação para $i=20^\circ$ ; $n=10$ . ....	70
Figura 5.12 - Comparação entre as envolventes de rotura teórica e a obtida na modelação para $i=20^\circ$ ; $n=5$ . ....	70
Figura 5. 13 - Gráfico tensão tangencial-deslocamento horizontal para $\sigma_n=0.5$ MPa. ....	71
Figura 5.14 - Gráfico tensão tangencial-deslocamento vertical para $\sigma_n=0.5$ MPa. ....	72
Figura 5.15 – Evolução dos elementos de cedência para uma tensão normal de 0.5 MPa e carga distribuída horizontal de 0.1 a 1.9 MPa com intervalos de 0.2 MPa. ....	73
Figura 5.16 - Representação da ocorrência de dilatância para $T=1.8$ MPa; a) Malha de elementos finitos; b) Deslocamentos horizontais. ....	73
Figura 5.17 - Gráfico tensão tangencial-deslocamento horizontal para $\sigma_n=2$ MPa. ....	74
Figura 5.18. - Evolução dos elementos de cedência ao longo do ensaio para uma tensão normal de 2 Mpa e uma carga distribuída horizontal de 1, 2, 4, 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.9, 6 MPa ....	75
Figura 5.19 – Deslocamentos horizontais para um carregamento horizontal de 6.8 MPa e 6.9 MPa .	75



Figura 5.20 - Representação do ponto de tensões para o cálculo de fator de segurança. ....	76
Figura 5.21 - Gráfico comparativo de valores de SRF para as juntas normais e simétricas. ....	78
Figura 5.22 - Gráfico comparativo dos valores de SRF para as diferentes situações. ....	79
Figura 5.23 - a) Junta com $\theta=0$ ; b) Junta com $\theta=50^\circ$ .....	80
Figura 5.24 - Gráfico representativo da variação da inclinação aparente das asperezas ( $\alpha$ ) em função do aumento do ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ). ....	80
Figura 5.25 - Variação do SRF em função do ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ). ....	81
Figura 5.26 - Gráfico tensão tangencial-deslocamentos horizontais para diferentes orientações das asperezas sob tensão normal constante igual a 0.5 MPa.....	82
Figura 5.27 - Gráfico tensão tangencial-deslocamentos horizontais para diferentes orientações das asperezas sob tensão normal constante igual a 2MPa.....	83
Figura 5.28 - Esquema representativo dos deslocamentos horizontais nas proximidades da descontinuidade para os diferentes ângulos de orientação das asperezas, $\theta$ . ....	83
Figura 5.29 - Representação esquemática da direção de deslocamentos, a) $\theta=0$ ; b) $\theta \neq 0$ .....	84

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Técnicas de caracterização dos parâmetros das descontinuidades (Azevedo & Marques, 2002). .....	8
Tabela 2.2 - Intervalo de valores do ângulo de atrito definido para cada tipo de rocha (González de Vallejo, 2002). .....	23
Tabela 4.1 - Características gerais adotadas para os materiais do modelo. ....	49
Tabela 4.2 - Características gerais adotadas para as descontinuidades. ....	49
Tabela 4.3 - Dados relativos às descontinuidades modeladas. ....	52
Tabela 4.5 - Características adotadas para a definição de orientação das asperezas. ....	59
Tabela 5.1 - Valores de tensão normal e tangencial correspondentes ao ponto A da figura 5.3 para cada uma das inclinações consideradas. ....	67
Tabela 5.2 - Fatores de segurança obtidos analiticamente. ....	77
Tabela I.2 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para $\sigma_n=0,2$ MPa. ....	93
Tabela I.3 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para $\sigma_n=0.5$ MPa. ....	94
Tabela I.4 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para $\sigma_n=1$ MPa. ....	94
Tabela I.5 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para $\sigma_n=2$ MPa. ....	95
Tabela I.6 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para $\sigma_n=4$ MPa. ....	95
Tabela II.4 - Valores de tensão tangencial para a situação limite de rotura para as juntas com $i=20^\circ$ . ..	98
Tabela II.5- Valores de tensão tangencial para a situação limite de rotura para as juntas com $i=15^\circ$ . ..	99
Tabela II.6 - Valores de tensão tangencial para a situação limite de rotura para as juntas com $i=10^\circ$ . .....	100
Tabela II. 7 Valores de tensão tangencial para a situação limite de rotura para as juntas com $i=5^\circ$ . ..	101
Tabela II.8 - Ensaio de resistência ao corte para $\sigma_n=0.5$ MPa para junta com $i=20^\circ$ e $n=6$ (dilatância). .....	102
Tabela II.9 - Ensaio de resistência ao corte para $\sigma_n=2$ MPa para junta com $i=20^\circ$ e $n=6$ (corte e dilatância). ....	102
Tabela III.1 - Valores de SRF obtidos para diferentes orientações das asperezas para $\sigma_n=0.1$ MPa e $T=0.3$ MPa. ....	101
Tabela III.2 - Ensaio de resistência ao corte para $\sigma_n=0.5$ MPa para junta com $i=20^\circ$ e $n=6$ para os diferentes valores de $\theta$ . ....	101
Tabela III.3 - Ensaio de resistência ao corte para $\sigma_n=2$ MPa para junta com $i=20^\circ$ e $n=6$ para os diferentes valores de $\theta$ . ....	102



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - Área da superfície da descontinuidade

c - Coesão;

e - Espaçamento entre famílias de descontinuidades

$I_s$  - Índice relativo à carga de rotura

ISRM - International Society for Rock Mechanics

i - Ângulo de inclinação médio das saliências

$i_0$  - Ângulo de inclinação aparente

JCS - Resistência à compressão das paredes da descontinuidade (*joint wall compression strength*)

JRC - Coeficiente de rugosidade da descontinuidade (*joint roughness coefficient*)

[K] - Matriz rigidez;

L - Comprimento da base das asperezas para  $\theta=0$

$L_\theta$  - Comprimento da base das asperezas para  $\theta \neq 0$

m - Constante adimensional do critério de Hoek-Brown

N - Carga normal aplicada nos ensaios de resistência ao corte e deslizamento

n - número de saliência de uma junta

$\{Q\}$ (Pereira)(Pereira)(Pereira)(Pereira)(Pereira) - Vetor das forças nodais.

$\{q\}$  - Vetor deslocamentos;

R - Valor do ressalto de uma superfície sã, medido no martelo de Schmidt

r - Valor do ressalto de uma superfície no estado natural, medido no martelo de Schmidt

S - Carga tangencial aplicada nos ensaios de resistência ao corte e deslizamento

SRF - Strength Reduction Factor

SSR - *Shear Strength Reduction*

s - constante adimensional do critério de Hoek Brown

$\alpha$  - Ângulo de inclinação medido no ensaio “*tilt test*”

$\alpha_1$  e  $\alpha_2$  - Ângulos correspondente à direção de mergulho

$\beta_1$  e  $\beta_2$  - Ângulos correspondente ao mergulho

$\delta_t$  - deslocamento tangencial

$\theta$  - Ângulo de orientação das asperezas

$\sigma_c$  - Resistência à compressão simples da matriz rochosa

$\sigma_n$  - Tensão normal

$\tau$  - Tensão de corte

$\tau_p$  - Tensão de corte de pico

$\phi$  - Ângulo de atrito interno da matriz rochosa

$\phi_b$  - Ângulo de atrito de básico

$\phi_p$  - Ângulo de atrito de pico

$\phi_r$  - Ângulo de atrito de residual



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 ENQUADRAMENTO

O estudo das características geotécnicas de um maciço rochoso no qual se insere uma obra de engenharia civil é fundamental para garantir a sua segurança e fiabilidade. Por vezes, a precisão deste estudo é função da complexidade da obra, sendo tando mais pormenorizado quanto maior a importância da obra.

Um maciço rochoso é uma estrutura geológica que se desenvolve na Natureza e, independentemente do seu estado de formação e posterior evolução, apresenta sempre superfícies de descontinuidade. Estes planos que interrompem a continuidade do maciço rochoso conferem condições de anisotropia e heterogeneidade, afetando as características de resistência e deformação do elemento onde se inserem.

O comportamento resistente e deformacional do elemento geotécnico poderá ser essencialmente condicionado pelos planos de descontinuidade. Mesmo quando se trata de um maciço rochoso de elevada qualidade, se estas interfaces apresentarem orientação, características físicas, mecânicas ou hidráulicas desfavoráveis, o comportamento global do maciço é afetado pela sua presença. Esta condição é confirmada nos problemas de engenharia civil, onde as superfícies de compartimentação influenciam de forma negativa a deformação e resistência do maciço, a distribuição de tensões e a presença de água (Pereira 1994).

Tendo em consideração estes fatores, compreende-se a necessidade da análise geotécnica de um maciço rochoso integrar não só o estudo da massa rochosa que o compõe mas também os planos que o intersectam.

A presente dissertação está inserida na análise das características das descontinuidades, em especial a resistência ao deslizamento em função da sua geometria. Este estudo pode ser efetuado recorrendo a ensaios de resistência ao corte em laboratório ou *in-situ*. Por sua vez, estes ensaios de idêntica conceção, consistem na preparação de uma amostra que contenha uma descontinuidade que se pretenda analisar, e de seguida, com material adequado, é aplicada uma tensão normal constante e uma tensão de corte que deve aumentar progressivamente, provocando um deslizamento de um dos blocos sob a superfície de descontinuidade que intersecta o provete. Os resultados deste ensaio exprimem a resistência ao deslizamento da descontinuidade.

Neste trabalho efetuou-se uma análise computacional em alternativa aos ensaios físicos mencionados. Simulando as condições físicas e morfológica de um ensaio de resistência ao corte. O *software* analisa de forma detalhada do comportamento mecânico do elemento recorrendo ao método dos elementos finitos.

## 1.2 OBJETIVOS

A rugosidade é um parâmetro que afeta a resistência ao corte e deslizamento de um maciço rochoso, sendo a sua estabilidade condicionada por este parâmetro. Com o presente trabalho pretende compreender-se em que medida a geometria da superfície de uma descontinuidade presente num provete influência o comportamento mecânico global do elemento.

Com recurso a *software* de cálculo baseado no método de elementos finitos, objetiva-se a simulação numérica do comportamento mecânico de juntas em modelos bidimensionais e tridimensionais. A criação de diversas juntas com diferentes geometrias contribui para este estudo na medida em que a comparação entre elas poderá representar um índice importante no que diz respeito à influência das mesmas na resistência ao corte e deslizamento do provete, podendo efetuar-se uma analogia com os efeitos em larga escala.

A análise do comportamento das juntas, nomeadamente a resistência ao deslizamento, é efetuada recorrendo a ensaios laboratoriais ou *in-situ*, que, na generalidade dos casos, são morosos e implicam custos elevados. Um adequado suporte numérico poderá representar uma alternativa ou uma ferramenta complementar rápida, económica e podendo ser igualmente fiável.

Como é sabido, na Natureza a rugosidade das descontinuidades não é uniforme, no entanto, ao criar-se modelos com diferentes geometrias procura-se uma similaridade com as descontinuidades existentes nos maciços rochosos. Assim, em casos práticos de engenharia civil, em particular problemas geotécnicos, pretende compreender-se a influência da geometria dos planos de descontinuidade na estabilidade de estruturas rochosas.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo que o primeiro capítulo é introdutório. Os capítulos apresentam-se da forma que se considerou mais adequada para a melhor compreensão do trabalho desenvolvido.

No capítulo 2, "Descontinuidades", são abordados os aspetos essenciais das descontinuidades presentes nos maciços rochosos. Apresentam-se e descrevem-se os tipos de descontinuidades existentes, bem como os parâmetros de caracterização das descontinuidades individualmente. Neste capítulo são também descritos os critérios teóricos mais comuns de resistência das descontinuidades.

No capítulo 3, "Ensaio de resistência ao corte", são referidos os ensaios de resistência ao corte *in situ* e laboratoriais frequentemente utilizados e também o tratamento dos dados obtidos neste tipo de ensaios. Este capítulo integra ainda a descrição do equipamento presente na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a apresentação de alguns provetes ensaiados com este equipamento.

No capítulo 4, "Modelos numéricos", é efetuada uma breve descrição do *software* utilizado, bem como do método em que se baseia o cálculo automático, método dos elementos finitos. De seguida são definidas as características gerais do modelo, adotadas para as análises numéricas efetuadas. Ainda neste capítulo, são apresentadas as características geométricas e morfológicas de cada uma das descontinuidades utilizadas na análise computacional. Para as descontinuidades com rugosidade com orientação oblíqua relativamente ao plano de corte, são apresentados os modelos que definem o seu desenvolvimento num plano tridimensional.

No capítulo 5, "Análise paramétrica", são expostos os resultados obtidos com recurso ao *software* apresentado no capítulo 4. Neste capítulo é efetuado o tratamento dos dados, apresentando-se esquemas



representativos dos resultados. As teorias de resistência ao corte apresentadas no capítulo 2 são aplicadas aos modelos desenvolvidos e comparadas com os resultados obtidos com a modelação.

Para finalizar, no capítulo 6, “Conclusões e desenvolvimentos futuros”, é efetuado um resumo dos aspetos mais importantes e das conclusões obtidas no decorrer da presente dissertação. Tendo por base o trabalho realizado, são sugeridas algumas linhas de orientação para futuro desenvolvimento do tema.



## 2 DESCONTINUIDADES

### 2.1 ASPETOS GERAIS

Devido a processos naturais, ao longo do tempo formam-se na Natureza estruturas rochosas de elevada complexidade. Estas estruturas designadas por maciços rochosos encontram-se na maior parte dos casos compartimentadas em blocos, pelo facto de apresentarem descontinuidades que dividem a estrutura. De um modo geral, os planos de descontinuidade condicionam o maciço rochoso conferindo-lhe anisotropia e heterogeneidade. O conhecimento destes fatores em comunhão com as deformações que podem exibir e o estado de tensão a que os mesmos se encontram submetidos na Natureza, definem o comportamento expectável dos maciços nas diversas situações, sendo este o grande alvo de estudo da Engenharia geotécnica.

Pelo facto dos maciços rochosos serem constituídos por blocos e por planos de descontinuidade, torna-se essencial que o seu estudo mecânico integre não só a análise do material rochoso sem as descontinuidades (matriz rochosa), mas também o estudo dos planos que interrompem a sua continuidade.

Na Figura 2.1 encontra-se ilustrada a gradual transição entre a matriz rochosa como elemento intato e o maciço rochoso que integra na sua constituição as famílias de descontinuidades dependendo da escala observada.

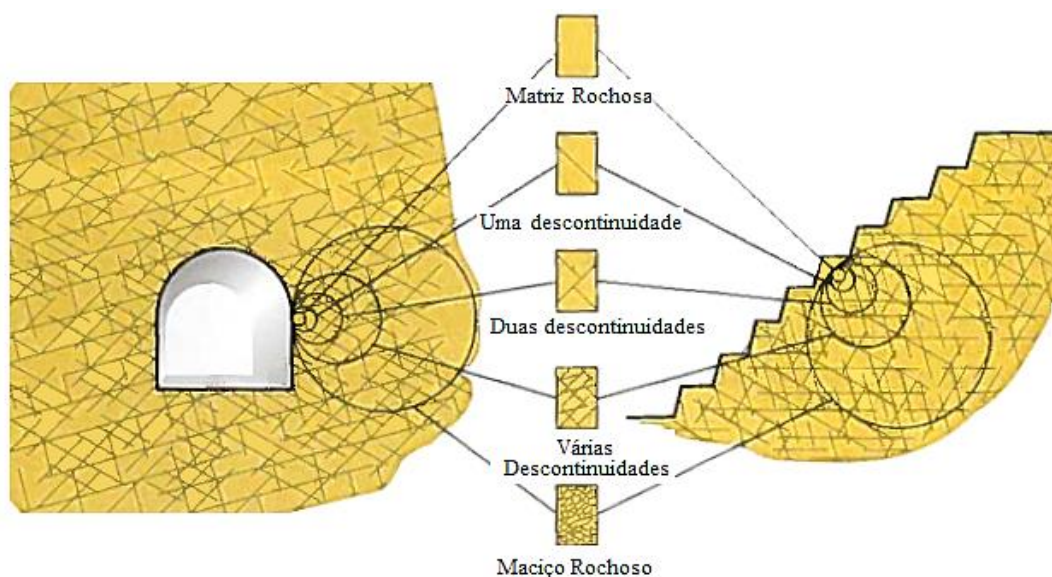


Figura 2.1 - Representação da transição entre a matriz rochosa e o maciço rochoso (González de Vallejo 2002).

As descontinuidades têm um papel de elevada importância na análise do maciço rochoso, pois a presença destas condiciona o comportamento resistente, deformacional e hidráulico do mesmo. De um modo geral, as descontinuidades apresentam planos preferenciais de alteração, meteorização, fratura e fluxo de água, podendo condicionar as propriedades geotécnicas do maciço rochoso (Coutinho 2009). Assim sendo, em qualquer construção geotécnica é fundamental a caracterização destes planos de forma a evitar situações que contribuam para a instabilidade da construção.

O grau de fracturação do maciço rochoso, a forma e o tamanho dos volumes de rocha intacta são definidos pela presença de diversas famílias de descontinuidades com diferentes orientações (González de Vallejo 2002).

Uma das características das descontinuidades que mais afeta o comportamento do maciço rochoso é a resistência ao corte, geralmente bastante inferior à resistência da rocha intacta. Para a sua estimativa será necessário a identificação das características físicas e geométricas do plano onde esta se encontra. A resistência ao corte das descontinuidades será um dos principais objetos de estudo ao longo da presente dissertação, onde será demonstrada a sua importância a uma reduzida escala.

## 2.2 TIPOS DE DESCONTINUIDADES

O termo descontinuidade refere-se a qualquer plano de separação física de uma formação rochosa, podendo ter origem sedimentar, térmica ou tectónica. Como o modo de formação agrupa de forma natural entidades geológicas com as mesmas dimensões e propriedades resistentes, é comum que a sua classificação seja efetuada de acordo com o seu processo de formação na Natureza.

De seguida será efetuada uma breve abordagem relativa aos tipos de descontinuidades mais frequentes nos maciços rochosos.

- Falha

São causadas por um deslocamento de grandeza significativa ao longo da superfície de separação das partes, usualmente designada por superfície ou plano de falha. Estas separações físicas raramente são unidades singulares, já que ocorrem normalmente como um conjunto de descontinuidades paralelas ou sub-paralelas. Este conjunto de descontinuidades constitui as designadas famílias de descontinuidades.

- Plano de estratificação

Descontinuidades que limitam os estratos ao longo do processo de formação das rochas sedimentares desenvolvendo-se de forma paralela à superfície. Trata-se de descontinuidades sistemáticas com elevada continuidade cujo espaçamento varia entre poucos centímetros e vários metros.

- Plano de foliação

Formam-se em rochas metamórficas, sendo que a sua formação é determinada pela orientação dos minerais lamelares ou bandas minerais.

- Diáclase

São os planos de descontinuidade mais frequentes nos maciços rochosos, que correspondem a superfícies de fracturação onde não ocorreram deslocamentos ou onde estes são pouco significativos. As diáclases são classificadas de acordo com as tensões que as originam, podendo ser designadas de diáclases de corte (*shear joint*) ou diáclases de tração (*tension joint*). Um conjunto de diáclases

sensivelmente paralelas e com a mesma origem designa-se por família de diáclases (*joint set*), por sua vez, um conjunto de duas ou mais famílias de diáclases denomina-se sistema de diáclases (*joint sistem*).

- Clivagem de fratura

São fraturas paralelas formadas em camadas rochosas de baixa resistência (incompetentes), intercaladas por camadas com um grau de resistência superior (competentes) que, ao serem dobradas, conduzem ao surgimento de fraturas oblíquas à superfície de estratificação. A formação das superfícies de clivagem não é controlada pela orientação paralela das partículas minerais.

- Xistosidade

Este tipo de descontinuidades surge em rochas cuja formação implica a disposição dos planos paralelos dos minerais do tipo lamelar ou prismático.

Relativamente ao estudo e análise das descontinuidades, no caso das falhas, estas devem ser caracterizadas de forma individual por apresentarem diferentes orientações e propriedades físicas. Por outro lado, as diáclases, as superfícies de estratificação e as de xistosidade, conduzem à compartimentação do maciço rochoso de forma associada, por este motivo, o seu estudo deve ser estatístico.

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

Como foi citado nos aspetos gerais do presente capítulo, o processo de formação das descontinuidades poderá ter implicações a nível geométrico e mecânico do elemento rochoso onde se insere. Por este motivo é fundamental a caracterização dos planos de descontinuidade (Hudson and Harrison 2007).

Para que seja possível caracterizar as descontinuidades, existem parâmetros que devem ser analisados possibilitando a quantificação da resistência ao corte da descontinuidade, bem como a sua influência a nível de deformação e presença de água no maciço rochoso.

A descrição de cada família de descontinuidades deve ser efetuada tendo em conta os parâmetros que se apresentam de seguida:

- Orientação
- Espaçamento
- Persistência
- Rugosidade
- Resistência da parede
- Abertura
- Preenchimento
- Condições de fluxo
- Número de famílias
- Dimensão dos blocos

(ISRM 1977)

A Figura 2.2 demonstra através de um esquema os parâmetros que caracterizam as descontinuidades e a sua influência na geometria global do elemento rochoso.

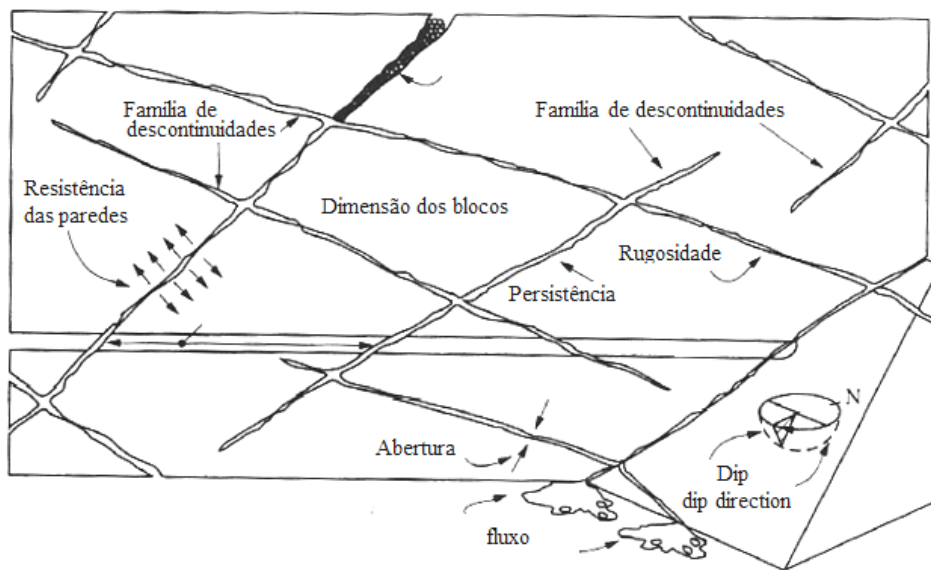


Figura 2.2 - Representação dos parâmetros de caracterização das descontinuidades (Hudson and Harrison 2007).

Relativamente aos métodos de medição das propriedades geométricas das famílias de descontinuidades, estes são altamente variáveis, não existindo um método exato para a caracterização geométrica estrutural da rocha (Hudson and Harrison 2007). No quadro apresenta-se a técnica para a medição de cada característica geométrica.

Tabela 2.1 - Técnicas de caracterização dos parâmetros das descontinuidades (Azevedo and Marques 2002).

Característica da descontinuidade	Técnica de medida
Orientação	Bússola geológica
Espaçamento	Fita métrica
Persistência	Fita métrica
Rugosidade	Ábacos de referência
Resistência da parede	Martelo de Schmidt
Abertura	Escala
Preenchimento	Observação tátil-visual
Condições de fluxo	Observações no tempo
Número de famílias	Projeção estereográfica
Tamanho do bloco	Frequência de abertura

Importa referir que, para todos os parâmetros de caracterização de descontinuidades apresentados, a ISRM (Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas) sugere metodologias de cálculo e avaliação a nível quantitativo e qualitativo, tendo por base inúmeros ensaios realizados. Este documento permite

que exista um grau de uniformidade na descrição de descontinuidades em maciços rochosos, servindo assim como suporte de comunicação entre geólogos e engenheiros (ISRM 1977)

O trabalho realizado na presente dissertação implica um melhor conhecimento de alguns destes parâmetros, uma vez que o seu conceito é fundamental para a compreensão das características das juntas que foram numericamente definidas. Assim, para estes parâmetros será efetuada uma abordagem mais específica.

### 2.3.1 ORIENTAÇÃO

A orientação das descontinuidades é um parâmetro fundamental na análise de estabilidade de qualquer obra de engenharia civil, pelo facto de o mesmo número de descontinuidades apresentar efeitos favoráveis ou desfavoráveis, dependendo da sua orientação relativamente à obra de engenharia em análise. Na Figura 2.3 apresenta-se o efeito da orientação das descontinuidades num plano bidimensional enquadrado numa obra de engenharia, onde é possível destacar a sua influência negativa pelo surgimento de possíveis planos de rotura.

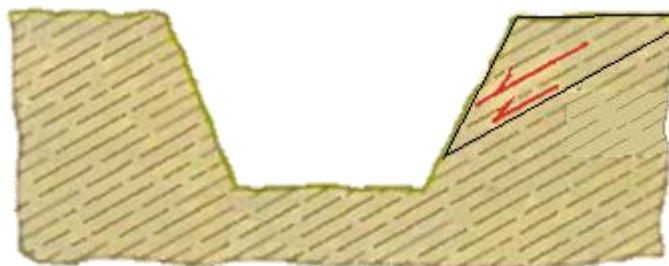


Figura 2.3 - Ilustração do efeito desfavorável da orientação (González de Vallejo 2002).

A orientação ou altitude de uma descontinuidade é definida pela direção de mergulho (direção da linha de máxima pendente do plano de descontinuidade relativamente ao Norte) e pelo mergulho da linha mais inclinada em relação à horizontal. A direção de mergulho varia entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$  e o mergulho varia entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Como se pode ver na Figura 2.4, a direção do plano da descontinuidade corresponde ao ângulo entre a direção Norte e a linha de interseção entre o plano da descontinuidade e o plano horizontal. A direção do plano de descontinuidade forma um ângulo reto com a direção de mergulho.

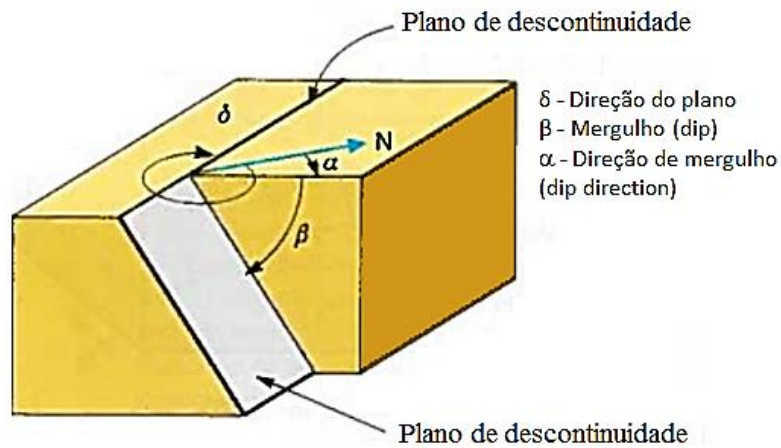


Figura 2.4 - Definição da orientação de descontinuidades (González de Vallejo 2002).

### 2.3.2 ESPAÇAMENTO

O espaçamento é definido pela distância entre planos de descontinuidades de uma mesma família medidos na direção perpendicular, como se pode observar na Figura 2.5.

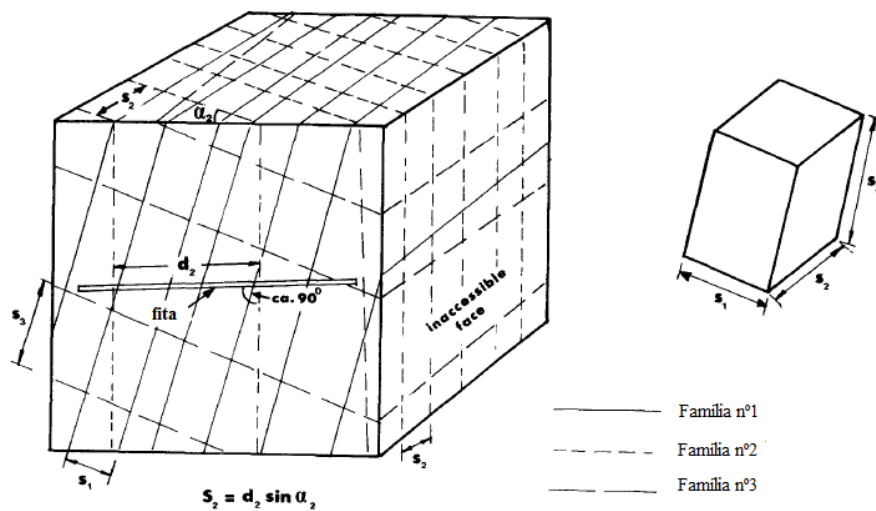


Figura 2.5 - Representação do espaçamento de descontinuidades (ISRM 1977).

O comportamento do maciço rochoso pode variar em função da distância entre descontinuidades, na medida em que um espaçamento demasiado pequeno manifesta-se pela perda de coesão do maciço rochoso. Por outro lado, em maciços rochosos com descontinuidades muito afastadas prevalecem as propriedades da matriz rochosa nos processos de deformação e rotura.

### 2.3.3 RUGOSIDADE

A rugosidade é um parâmetro das descontinuidades com elevada importância na avaliação da resistência ao corte, especialmente para descontinuidades não preenchidas, sem coesão.



O termo rugosidade refere-se não só às irregularidades das superfícies de descontinuidade (variabilidades em pequena escala), mas também à ondulação das mesmas (variabilidades em larga escala). Assim sendo, é simples compreender que para situações de maior rugosidade existe um incremento de resistência ao corte, porque o deslizamento tangencial fica dificultado.

A análise da rugosidade pode ser efetuada recorrendo a métodos quantitativos ou qualitativos, consoante a precisão pretendida, a escala medida ou a acessibilidade à superfície. Estes métodos baseiam-se na análise de perfis de rugosidade, sendo que no caso das análises quantitativas é ainda possível a realização de perfis lineares.

De acordo com o ISRM, o efeito dos diferentes tipos de rugosidade requer que na análise qualitativa deste parâmetro sejam distinguidas duas escalas:

- Decimétrica e métrica, para caracterizar a ondulação: superfície plana, ondulada ou em patamares;
- Milimétrica e centimétrica, para caracterizar a rugosidade: superfície polida, lisa ou rugosa.

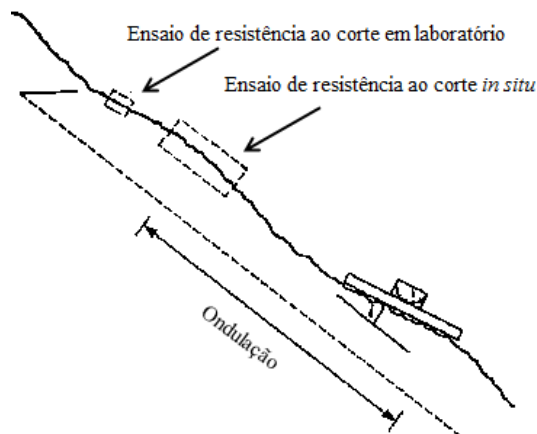


Figura 2.6 - Tipos de escalas e respetivos ensaios para definição da rugosidade e ondulação (ISRM 1977).

Com estas características, o ISRM definiu os perfis de rugosidade apresentados na Figura 2.7, permitindo que seja feita uma análise qualitativa por comparação visual da rugosidade com os perfis propostos. De acordo com estes perfis, a resistência tangencial da superfície vai diminuindo de I a IX. Também Barton e Choubey propuseram uma série de perfis típicos de rugosidade associando a cada um deles um valor de coeficiente de rugosidade JRC.

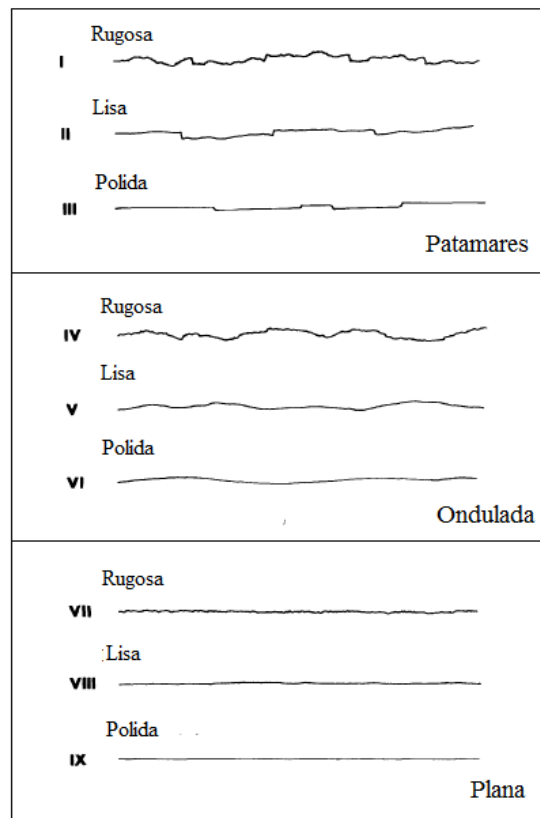


Figura 2.7 - Perfis de rugosidade típicos considerando as duas escalas (ISRM 1977).

#### 2.3.4 NÚMERO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES

O número de famílias de descontinuidades condiciona o comportamento mecânico e deformacional, e os mecanismos de rotura de um maciço rochoso (González de Vallejo 2002). O tamanho dos blocos e o grau de fracturação presentes no maciço são formados pelo número, espaçamento e orientação das famílias de descontinuidade. Por sua vez, uma família de descontinuidades é caracterizada pela sua orientação no espaço e pelas propriedades e características dos planos.

Este parâmetro permite determinar a extensão do maciço rochoso que se pode formar sem que ocorra rotura da matriz rochosa (Coutinho 2009). Assim sendo, compreende-se que o número de famílias, bem como a sua orientação, são determinantes para garantir a estabilidade de uma obra de engenharia.

A figura 2.8 apresenta três blocos com diferentes números de famílias de descontinuidades, sendo estas definidas segundo uma orientação e espaçamento.

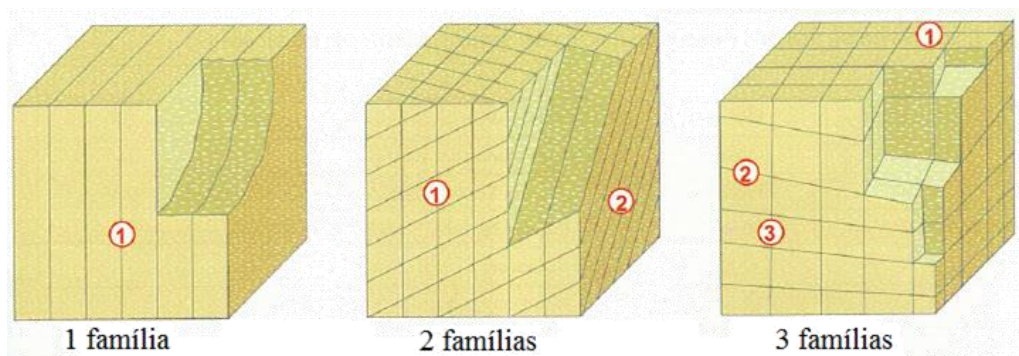


Figura 2.8 - Representação do número famílias de descontinuidades (González de Vallejo 2002).

## 2.4 RESISTÊNCIA DAS DESCONTINUIDADES

Como foi visto no início do presente capítulo, o estudo de um maciço rochoso implica uma caracterização e análise não só da matriz rochosa como também das descontinuidades presentes no elemento rochoso. Assim sendo, a resistência das descontinuidades tem um papel muito importante no comportamento do maciço. No caso de maciços rochosos em que a rocha intacta é de elevada resistência, o comportamento global do maciço dependerá particularmente da capacidade resistente da matriz rochosa (Coutinho 2009). É então fundamental o conhecimento das resistências de ambos os elementos (rocha intacta e descontinuidades), para que seja avaliada a resistência de acordo com o elemento que mais condiciona a estrutura. Outro motivo pelo qual as descontinuidades devem ser estudadas é o facto de a sua distribuição ser mais ou menos aleatória, conferindo ao maciço elevada anisotropia particularmente no que diz respeito às propriedades resistentes.

Os deslizamentos sobre descontinuidades em maciços à superfície ou subterrâneos, como aberturas subterrâneas, fundação de barragens, túneis e taludes, podem ocorrer em qualquer direção dependendo das condições fronteira e das tensões exteriores atuantes na estrutura. Posto isto, torna-se imperativo compreender a variação da resistência tangencial das descontinuidades rochosas para se proceder a uma correta análise de estabilidade destas estruturas rochosas (Budi, Rao, and Deb 2014).

A Figura 2.9 ilustra o comportamento em termos de resistência ao corte para três tipos de descontinuidades e dois tipos de rocha. A inclinação da envolvente representa o ângulo de atrito do elemento e o valor da coesão corresponde à intersecção com o eixo da tensão de corte.

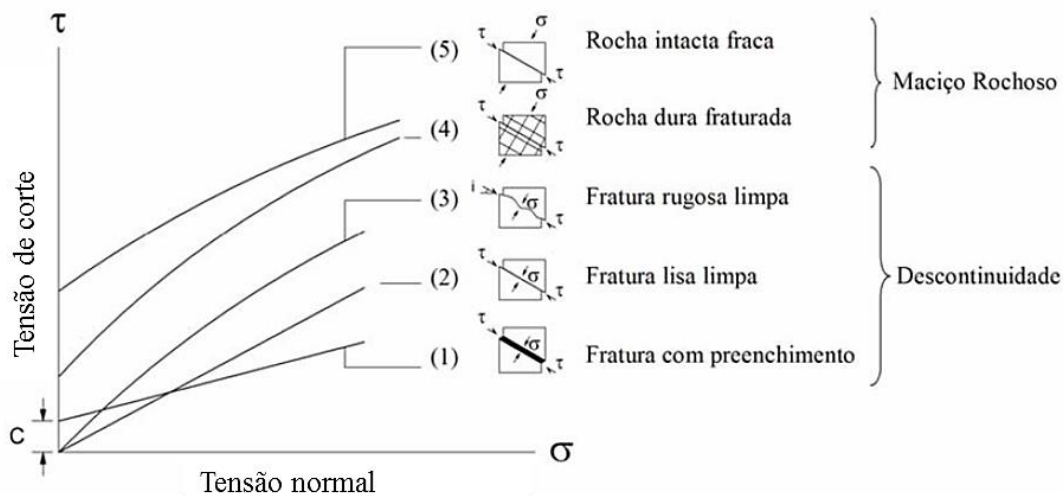


Figura 2.9 - Representação gráfica da relação tensão normal-tensão de corte para dois maciços rochosos e três tipos de descontinuidades (Neyra 2006).

Analisando a Figura, no caso (1) é apresentada uma fratura com preenchimento. Nestes casos, são considerados valores de coesão. Na envolvente (2), a coesão é nula pelo facto da descontinuidade ser lisa e não apresentar preenchimento. Para estes dois primeiros casos, a inclinação da envolvente é dependente do ângulo de atrito da rocha. Quando se analisa a situação (3), pode destacar-se o elevado ângulo de atrito porque o seu valor depende do ângulo de atrito da rocha e de uma componente ligada às irregularidades da superfície da descontinuidade. Para esta situação, o aumento da tensão normal provoca uma diminuição progressiva do ângulo de atrito fruto da redução das asperezas. Relativamente aos maciços rochosos, em (4) a rotura ocorre através da rocha intacta e ao longo das superfícies de descontinuidades e em (5) está representado um material de grão fino e por isso apresenta um baixo ângulo de atrito, que na ausência de fraturas apresentará elevada coesão (Neyra 2006).

Como se pode verificar, o comportamento mecânico de um maciço rochoso é condicionado pela massa rochosa e pelas descontinuidades, sendo que, na generalidade dos casos, as descontinuidades são mais condicionantes.

Para a determinação da resistência das juntas têm sido desenvolvidos alguns critérios ao longo dos tempos. Neste trabalho serão abordados com maior detalhe o critério linear de Mohr-Coulomb, o critério bilinear de Patton e o critério empírico de Barton e Choubey.

#### 2.4.1 CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB

O critério de Mohr-Coulomb é um critério de deformação linear aplicado com o objetivo de avaliar a resistência ao corte em função da tensão normal, do ângulo de atrito e da coesão. Este critério é utilizado na avaliação da resistência da rocha intacta podendo estender-se para a análise de descontinuidades.

Tendo por base um bloco sobre um plano inclinado, o autor concluiu que se a resultante das forças que atuam num dado elemento formassem um ângulo com a normal ao plano de descontinuidade inferior ao ângulo de atrito, este permaneceria imóvel na superfície plana. Com base nesta premissa, Mohr-Coulomb formulou uma equação para o cálculo da resistência ao corte de descontinuidades, dependendo

este valor da fricção entre as superfícies e da coesão, no caso de existir preenchimento na descontinuidade.

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi_p \quad (2.1)$$

Onde:

- $\sigma_n$  é a tensão normal aplicada sobre o plano de descontinuidade;
- $c$  é a coesão;
- $\phi_p$  é o ângulo de atrito de pico.

Para o caso de continuarem a ocorrer deslocamentos tangenciais após se atingir a resistência de pico, a resistência ao corte vai diminuindo até atingir um valor residual, como se observa na Figura 2.10. Para essa situação o valor da resistência ao corte ( $\tau_r$ ) é dado em função do ângulo de atrito residual ( $\phi_r$ ), deixando de existir coesão entre as superfícies de descontinuidade.

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \quad (2.2)$$

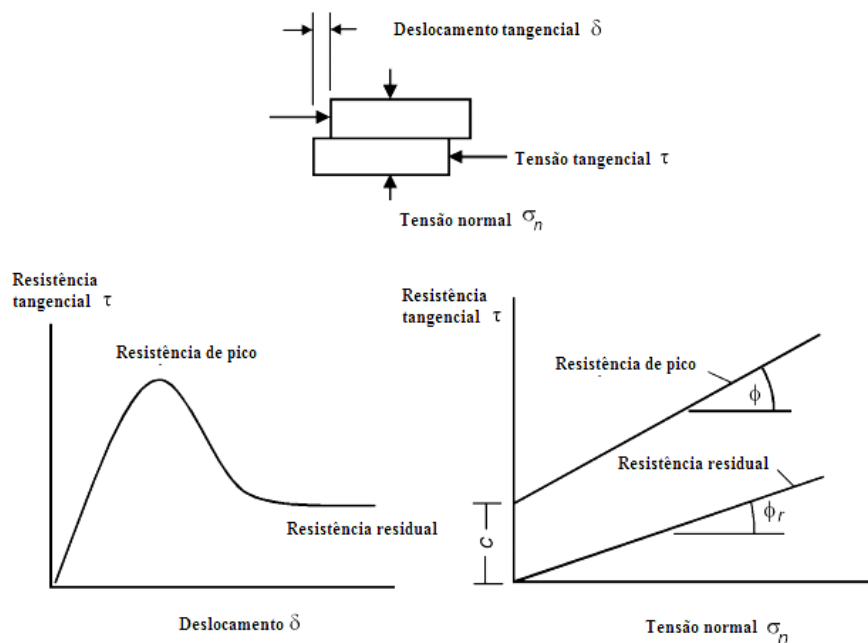


Figura 2.10 - Representação do comportamento de descontinuidades lisas no ensaio de corte ou deslizamento (Hoek 2000).

#### 2.4.2 CRITÉRIO DE PATTON

Com os desenvolvimentos na abordagem das descontinuidades, compreendeu-se que as irregularidades ao longo das superfícies das descontinuidades teriam um papel importante na determinação da resistência tangencial.

Em 1966, Patton estudou o efeito das irregularidades presentes nas rochas em estado natural em mais de 300 taludes rochosos.

Pelo facto dos resultados dos ensaios de corte serem complexos mesmo quando eram ensaiados provetes da mesma rocha, o autor utilizou provetes de material artificial, podendo assim avaliar separadamente o efeito da forma, tamanho e forças internas das irregularidades presentes nas descontinuidades. Como seria de esperar, os estudos de campo e laboratoriais de Patton mostraram que a resistência ao corte de um maciço é fortemente influenciada pelas irregularidades existentes na superfície das descontinuidades.

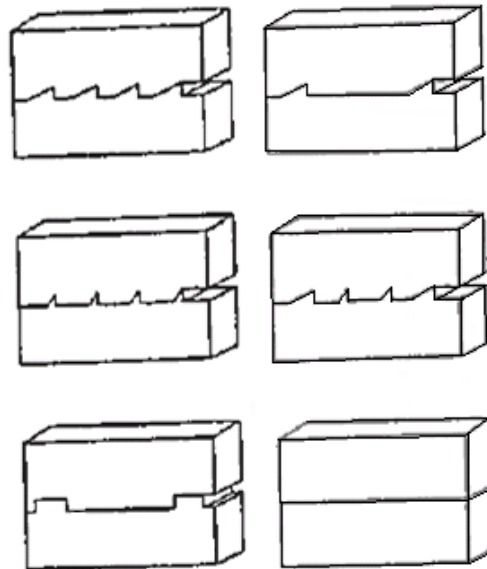


Figura 2.11 - Representação da geometria de alguns dos provetes de gesso utilizados por Patton (Patton 1966).

Com os resultados obtidos nas descontinuidades geometricamente definidas, Patton concluiu que considerando uma superfície com a rugosidade representada por um ângulo  $i$  em relação ao plano médio horizontal, o valor do ângulo de atrito total (ou ângulo de atrito de pico ( $\phi_p$ )) é a soma do ângulo médio das irregularidades ( $i$ ) com o ângulo de atrito básico ( $\phi_b$ ), de acordo com a equação apresentada.

$$\phi_p = \phi_b + i \quad (2.3)$$

No critério de Patton a coesão não é contabilizada no cálculo da resistência ao corte para descontinuidades que não apresentam preenchimento entre as paredes. Segundo este critério, quando se exerce um esforço tangencial sobre uma descontinuidade que se encontra submetida a baixos valores de tensão normal, para que ocorra deslocamento no sentido do plano é necessário que o ângulo  $i$  seja superado. A este fenómeno dá-se o nome de dilatância, sendo a tensão tangencial caracterizada pela

equação 2.4, que se encontra representada na Figura 2.12 pelo primeiro trecho da curva de tensão tangencial - tensão normal.

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (2.4)$$

Com o incremento da tensão normal ( $\sigma_n$ ) aplicada na superfície das descontinuidades e da tensão de corte até um determinado valor, verifica-se que, para a ocorrência de rotura (confirmada por deslocamento horizontal de um dos blocos) é necessário que ocorra o corte dos bordos das asperezas, aproximando assim as superfícies das irregularidades à horizontal. Nesta fase, a resistência tangencial passa a depender maioritariamente do ângulo de atrito básico ( $\phi_b$ ). No caso de continuar a haver um aumento da tensão normal para valores que impossibilitam a ocorrência de dilatância, é necessário o corte total das irregularidades para que se verifiquem deslocamentos horizontais. Para esta situação, a resistência ao corte passa a ser função de um ângulo de resistência residual de acordo com a equação 2.5, representada graficamente pelo segundo trecho da curva tensão de corte - tensão normal, Figura 2.12.

$$\tau_p = \sigma_n \tan \phi_r \quad (2.5)$$

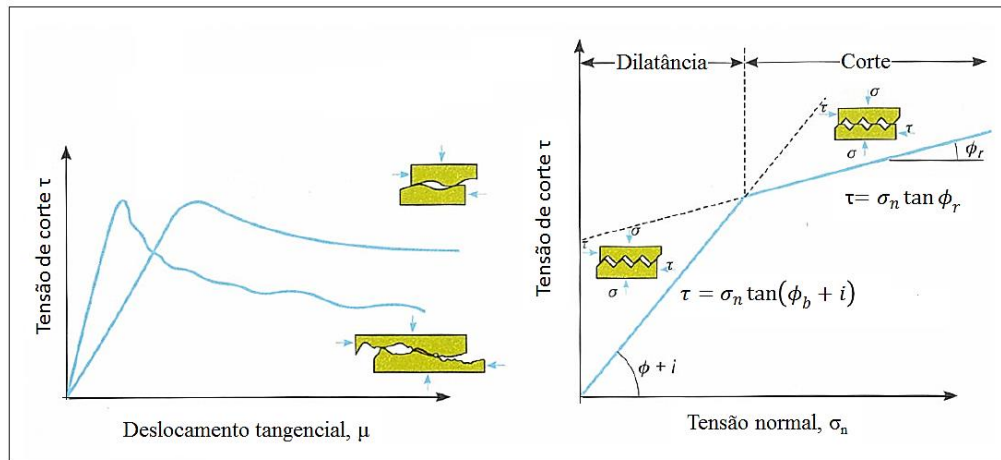


Figura 2.12 - Representação gráfica Tensão-Deslocamento tangencial para descontinuidades com rugosidade; Representação do critério bi-linear de Patton (González de Vallejo 2002).

Com as experiências efetuadas, o autor concluiu que a envolvente de rotura para amostras com descontinuidades que apresentam irregularidades é não linear, tendo nos seus cálculos aproximado a envolvente de rotura a duas retas. Segundo o autor as alterações no declive da envolvente de rotura estão relacionadas com as propriedades físicas das irregularidades ao longo da superfície de descontinuidade (Patton 1966).

### 2.4.3 CRITÉRIO DE BARTON E CHOUBEY

Em 1977, Barton e Choubey desenvolveram outro método para a quantificação da resistência das descontinuidades. Trata-se de um método empírico obtido a partir de ensaios laboratoriais, onde a influência das propriedades das descontinuidades no valor da resistência ao corte é notória.

Tendo por base os estudos efetuados em juntas naturais e artificiais, o critério foi sendo aperfeiçoado e atualmente a sua lei empírica é utilizada universalmente para a determinação da resistência ao corte de descontinuidades rugosas, sendo a sua expressão:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (2.6)$$

Onde:

- $\tau$  é a tensão tangencial aplicada ao plano de descontinuidade;
- $\sigma_n$  é a tensão normal aplicada ao plano de descontinuidade;
- JRC é o coeficiente de rugosidade da descontinuidade (*joint roughness coefficient*);
- JCS é a resistência à compressão das paredes da descontinuidade (*joint wall compression strength*);
- $\phi_r$  é o ângulo de atrito residual.

Com este critério, a resistência tangencial da descontinuidade para além de depender do valor de tensão normal aplicada, define-se através de três componentes: uma componente de fricção dependente do ângulo de atrito da descontinuidade, uma componente geométrica dada pelo parâmetro JRC e uma componente de aspereza que resulta da relação entre JCS e a tensão normal ( $\sigma_n$ ).

#### 2.4.3.1 Coeficiente de rugosidade da descontinuidade, JRC

O valor do parâmetro JRC, *Joint Roughness Coefficient*, depende da rugosidade das paredes da descontinuidade. Este valor varia entre 0 e 20, sendo que o mínimo é referente a juntas lisas que não apresentam dilatação e o máximo refere-se a juntas com alta rugosidade.

O valor da rugosidade pode ser obtido por comparação visual do perfil em estudo com a tabela de perfis típicos realizada por Barton e Choubey, Figura 2.13. Esta tabela foi obtida ao agrupar 136 amostras de juntas de acordo com o seu perfil de rugosidade, obtendo-se estes 10 perfis tipo.



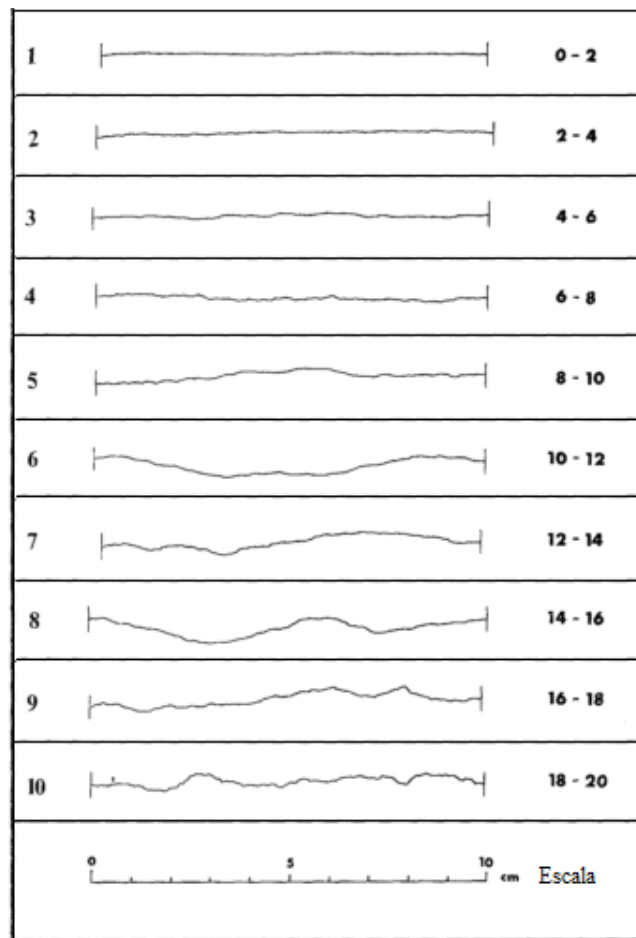


Figura 2.13 - Tabela com os valores de JRC para cada perfil tipo (Barton and Choubey 1977).

Em alternativa a esta metodologia, o cálculo do valor de JRC pode ser obtido recorrendo ao *tilt test*. O ensaio consiste em colocar no aparelho blocos de rocha separados pela descontinuidade e progressivamente inclinar a base do suporte até que a parte superior do bloco deslize sobre a parte inferior fixa, Figura 2.14.

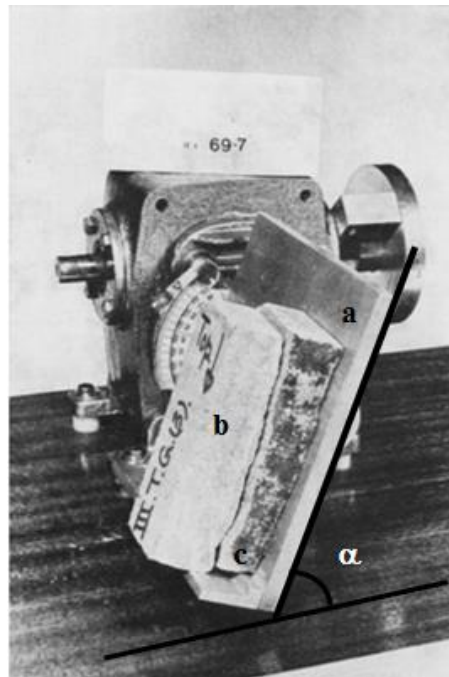


Figura 2.14 - Representação do ensaio *tilt test*; a-base; b-parte superior móvel; c-parte inferior fixa;  $\alpha$ -ângulo com a horizontal para o qual ocorre deslizamento (Barton and Choubey 1977).

Neste ensaio os valores de tensão normal ou de corte resultam exclusivamente do peso dos blocos. O ângulo para o qual se inicia o deslizamento de um dos fragmentos em relação aos outros designa-se  $\alpha$  e integra a expressão de cálculo do JRC apresentada.

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{JRC \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right)} \quad (2.7)$$

É ainda importante referir que o valor de JRC pode ser alternativamente obtido recorrendo ao ábaco apresentado na Figura 2.15, que relaciona o comprimento do perfil com a amplitude das asperezas.

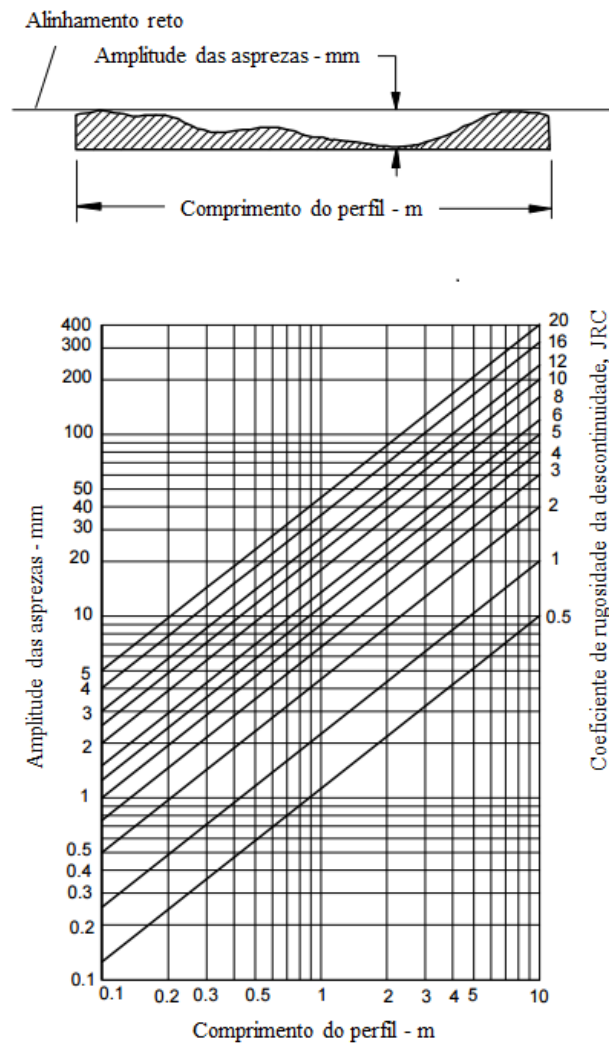


Figura 2.15 - Ábaco para estimar o valor de JRC em função da amplitude e do comprimento do perfil (Barton and Bandis 1982).

#### 2.4.3.2 Resistência à compressão das paredes da junta, JCS

A resistência à compressão das paredes da junta corresponde à resistência de finas camadas adjacentes à descontinuidade. Este parâmetro depende do estado de alteração e meteorização das paredes e o seu valor pode ser estimado recorrendo ao esclerómetro-Martelo de Schmidt. Posto isto, no caso das juntas não apresentarem sinais de alteração, o valor de JCS, *joint compressive strength*, é igual ao valor de resistência à compressão simples da matriz rochosa ( $\sigma_c$ ). O mesmo não acontece para juntas onde ocorra fluxo de água, nessas situações o valor de JCS poderá ser apenas uma fração da resistência à compressão da rocha intacta, tendo por isso especial importância nestes casos.

#### 2.4.3.3 Ângulo de atrito residual, $\phi_r$

Como já foi visto, na generalidade dos casos é comum que as paredes de uma descontinuidade se encontrem alteradas ou meteorizadas. Esta deterioração natural das descontinuidades faz com que o seu ângulo de atrito diminua com o passar do tempo. Por este motivo, o ângulo de atrito residual é inferior

ao ângulo de atrito básico, pelo que é importante a sua quantificação na aplicação de alguns dos critérios acima mencionados. Este parâmetro pode ser calculado de acordo com a expressão:

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R} \quad (2.8)$$

Onde:

- $\phi_b$  é o ângulo de atrito básico da rocha que se pode obter recorrendo ao *tilt test* ou a valores tabelados para diferentes rochas (2.4.4);
- $r$  corresponde ao valor obtido no ensaio com o martelo de Schmidt para a descontinuidade em estudo no seu estado natural, seco ou húmido;
- $R$  corresponde ao valor obtido no ensaio com o Martelo de Schmidt para uma superfície de descontinuidade intacta e seca do mesmo material da descontinuidade em estudo.

Importa referir que para descontinuidades intactas e secas, o valor do ângulo de atrito básico iguala ao residual, já que os valores dos ensaios com o martelo de Schmidt deverão ser iguais.

#### 2.4.4 ESTIMATIVA DO ÂNGULO DE ATRITO, $\phi_b$

Um dos parâmetros que integra as equações dos critérios que quantificam a resistência ao corte é o ângulo de atrito ( $\phi_b$ ). Este parâmetro de resistência pode ser calculado em laboratório a partir de ensaios de compressão uniaxial, ou recorrendo ao *tilt test*, representado na Figura 2.14.

Na tabela 2.2 apresentam-se os valores característicos para o ângulo de atrito de diferentes rochas. Como é natural, os valores do ângulo de atrito para a mesma rocha são variáveis em função da magnitude das tensões de confinamento aplicadas, da presença de água nos poros e da velocidade de aplicação da carga. Por este motivo os valores que se encontram no quadro correspondem a um intervalo de valores típicos do ângulo de atrito básico para a maior parte das rochas.

Tabela 2.2 - Intervalo de valores do ângulo de atrito definido para cada tipo de rocha (González de Vallejo 2002).

Rocha	Ângulo de atrito, $\phi_b$ (graus)
Andesito	45
Arenito	30-50
Basalto	48-55
Calcário	35-50
Cré	30
Quartzito	40-55
Diabase	40-50
Diorito	50-55
Dolomia	25-35
Xisto	25-30
Gabro	35
Gnaisse	30-40
Granito	45-58
Grauvaque	45-50
Mármore	35-45
Argilito	40-60
Ardósia	40-55
Gesso	30

#### 2.4.5 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Outro dos parâmetros que é necessário estimar para se resolver a equação de Barton é o valor da resistência à compressão da superfície da descontinuidade. Este parâmetro pode ser calculado recorrendo a dois tipos de ensaios que serão descritos de seguida.

- Ensaio de carga pontual (“*point load test*”)

Também denominado como ensaio “Franklin”, este ensaio permite a determinação da resistência à compressão de rochas intactas ou alteradas de forma simples. O ensaio consiste na rotura de uma amostra entre duas ponteiros cónicas. A portabilidade do equipamento para este ensaio, representado na Figura 2.16, permite que estes sejam realizados em campo.

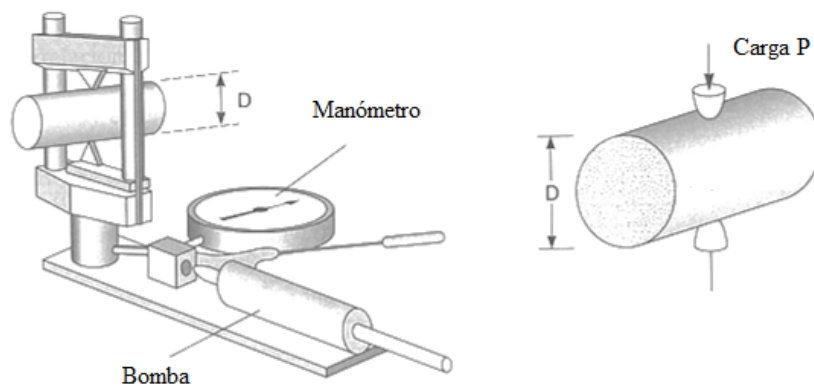


Figura 2.16 - Esquema representativo do ensaio de carga pontual (González de Vallejo 2002).

Com o valor da carga de rotura obtém-se um índice  $I_s$ , que se relaciona com a resistência à compressão de acordo com a equação 2.9, onde  $P$  é a carga de rotura e  $D$  o diâmetro da amostra ensaiada.

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (2.9)$$

$$\sigma_c = f I_s \quad (2.10)$$

Aplicando a equação 2.10, obtém-se o valor da resistência à compressão simples da rocha por multiplicação do índice obtido anteriormente ( $I_s$ ) com um fator  $f$ , relacionado com o diâmetro da amostra.

▪ Esclerómetro ou martelo de Schmidt

Este ensaio permite o cálculo aproximado da resistência à compressão de forma simples e rápida, recorrendo a um aparelho portátil que pode ser aplicado tanto em rochas como em descontinuidades.

O procedimento para a aplicação deste instrumento consiste em empurrar o êmbolo do martelo de forma perpendicular à superfície até que seja largado o êmbolo, originando um ressalto que é instantaneamente medido pelo aparelho, designado por  $R$ . Este valor situa-se entre 10 e 100 em função da resistência da rocha. Devem ser realizados dez ensaios em cada ponto a analisar, excluindo os cinco valores mais baixos e adotando um valor médio entre os cinco restantes.

Os valores obtidos da rocha ou descontinuidade com o esclerómetro são posteriormente relacionados recorrendo a um ábaco que em função da densidade da rocha, da inclinação do martelo e da inclinação da superfície a analisar, permite a obtenção do valor da resistência à compressão uniaxial, como se apresenta esquematizado no ábaco da Figura 2.17.

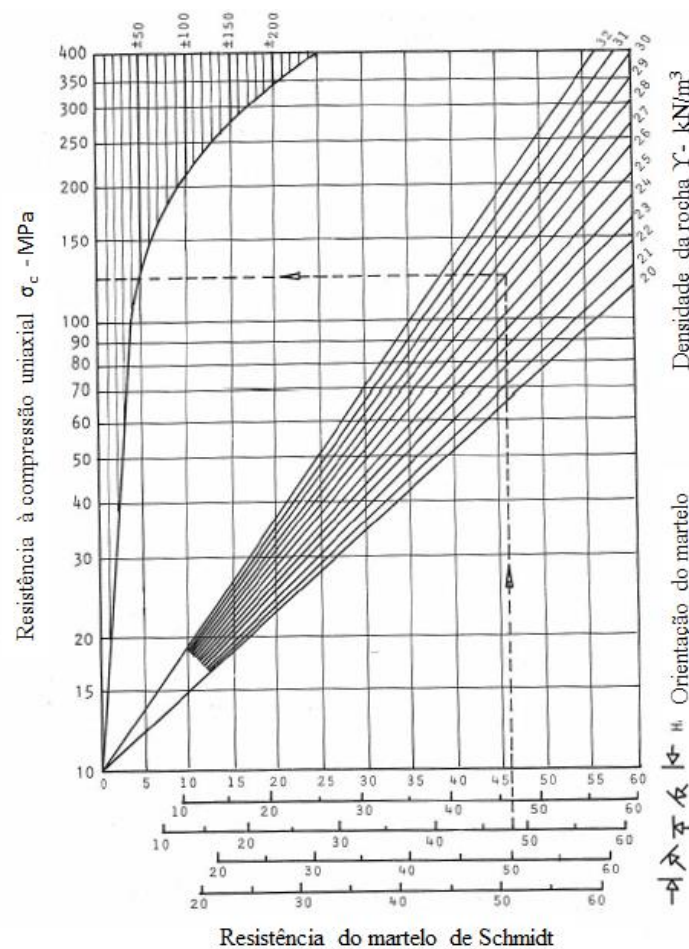


Figura 2.17 - Ábaco para estimativa da resistência à compressão uniaxial a partir da resistência do martelo de Schmidt (Bray and Hoek 1981).

#### 2.4.6 EFEITO DA ORIENTAÇÃO DAS ASPEREZAS NA RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DAS DESCONTINUIDADES

Ao longo do tempo, com base em experiências realizadas, foram sendo desenvolvidos diversos critérios de quantificação da resistência tangencial. Estes critérios incluem na sua formulação os aspetos morfológicos e o carregamento normal aplicado à superfície da descontinuidade como fatores que afetam globalmente a resistência da descontinuidade.

Embora estes critérios de resistência sejam bastante aceites nas análises geotécnicas de avaliação de resistência ao corte, a maior parte dos estudos considera a rugosidade através de um único perfil que se define com orientação perpendicular ao plano de corte (Khosravi et al. 2013).

Estudos mais recentes comprovam que a orientação das asperezas presentes na superfície de uma dada descontinuidade tem uma influência ao nível resistente e deformacional. Como a geometria da rugosidade influencia o tamanho e a distribuição das áreas de contacto durante o corte, esta característica deve ser considerada de forma precisa. Além disso, o tamanho, a forma e a distribuição espacial de zonas danificadas depende da direção de corte, do grau e distribuição das tensões, bem como do deslocamento horizontal. Assim, torna-se fundamental a caracterização tridimensional da superfície de uma descontinuidade (Grasselli, Wirth, and Egger 2002).

Para se estudar a tridimensionalidade de uma descontinuidade, numa primeira fase é importante que esta seja caracterizada por uma rugosidade constante, apresentando uma geometria regular que pode ser facilmente definida. Nestas condições geométricas torna-se mais simples a consideração da orientação das asperezas.

De forma a provar a influência da orientação das asperezas de uma descontinuidade no comportamento resistente e de deformação de um elemento, Khorsravi, Ali, *et al.* (2013) estudaram este efeito recorrendo a ensaios de resistência ao corte em juntas com geometria e orientação definidas. Na Figura 2.18 esquematiza-se a metade inferior dos provetes ensaiados, onde se pode observar a rugosidade tridimensional da superfície, bem como os fatores influentes na sua geometria.

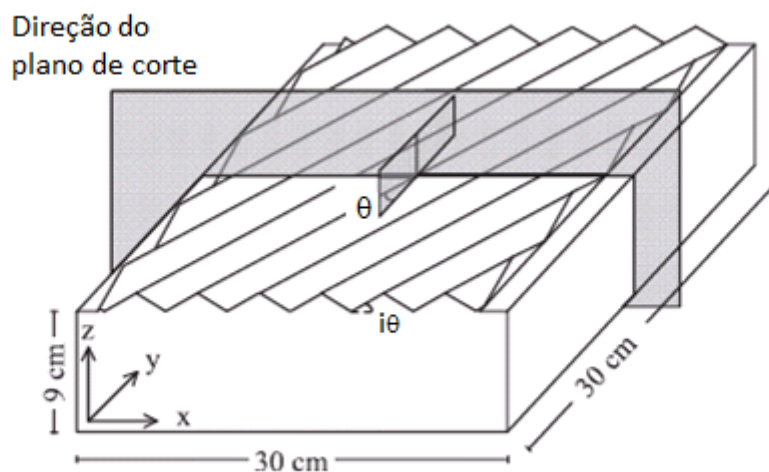


Figura 2.18 - Representação tridimensional da orientação das asperezas (Khosravi et al. 2013).

Na Figura 2.18 importa identificar os seguintes elementos:

- $\theta$  - Ângulo de orientação das asperezas
- $L$  - Comprimento da base das asperezas quando  $\theta=0$
- $L_\theta$  - Comprimento da base das asperezas quando  $\theta \neq 0$
- $i_\theta$  - Ângulo de inclinação aparente

Para a realização dos ensaios, os autores optaram por definir 3 níveis diferentes de tensões (60, 100 e 140 kPa) em 2 tipos de juntas com diferentes inclinações (15 e 30 graus). Numa primeira fase, efetuaram-se ensaios considerando um plano de corte com orientação normal ao plano da junta. Numa segunda fase, consideraram dois ângulos de orientação das descontinuidades diferentes de zero, ou seja, nesta fase o plano de corte foi considerado oblíquo relativamente ao plano das descontinuidades.

A consideração de orientação das asperezas presentes na superfície de uma descontinuidade relativamente ao plano de corte implica que as cargas que se encontram aplicadas deixem de ser orientadas de forma perpendicular ao plano da junta, formando assim um ângulo que representa a orientação da rugosidade relativamente à direção de carregamento.



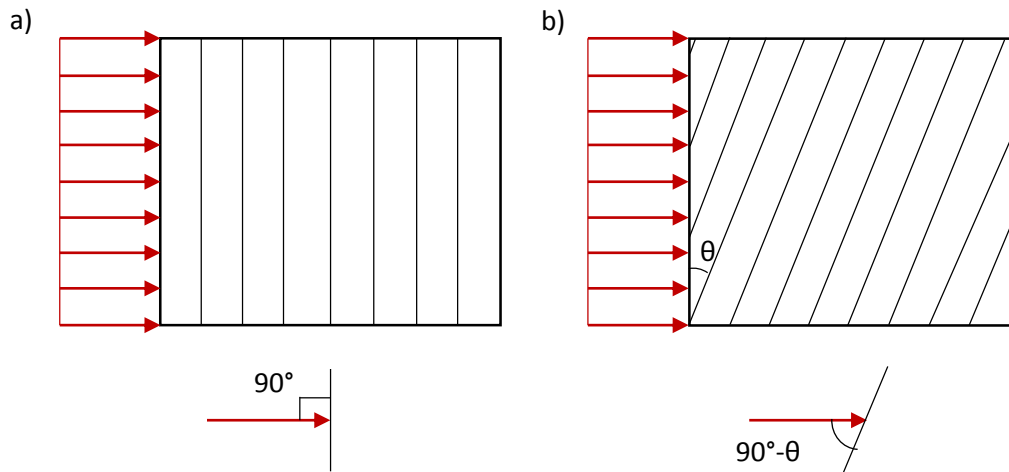


Figura 2.19 - a) Carregamento perpendicular à orientação das asperezas ( $\theta=0$ ); b) Carregamento oblíquo à orientação das asperezas ( $\theta \neq 0$ ).

Os resultados obtidos com os ensaios realizados na primeira fase permitiram constatar que o valor da tensão tangencial de pico aumenta não só com o aumento da tensão normal aplicada, mas também com o aumento da inclinação das saliências. Este resultado é coerente com outros critérios anteriormente formulados. Relativamente às deformações verificadas nos ensaios, os autores observaram que depois de se atingir o valor de tensão tangencial de pico, as deformações são bastante dependentes do valor das inclinações das descontinuidades. Para inclinações com menores valores, o valor da dilatância acompanha a inclinação das asperezas, não se verificando o corte das mesmas. Para valores de inclinação superiores, a resistência ao deslizamento é ultrapassada causando o corte das saliências, especialmente para valores de tensão normal mais elevados.

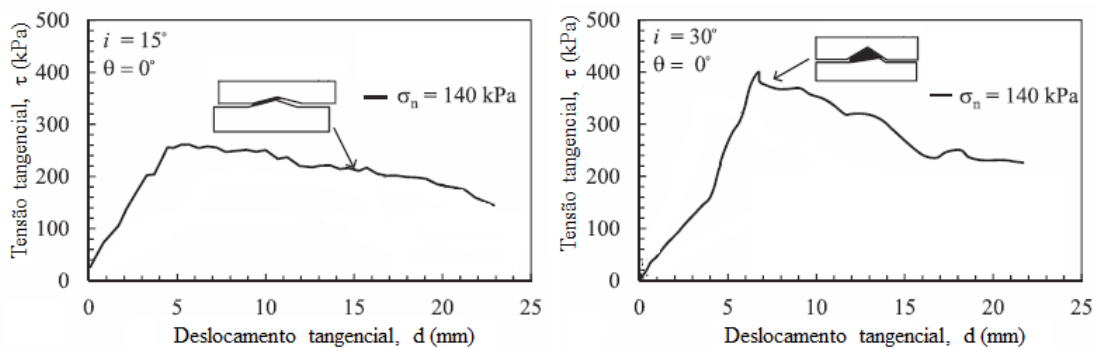


Figura 2.20 - Resultados dos ensaios sob tensão normal constante de 140 kPa (Khosravi et al. 2013).

Como se pode observar na Figura, sob uma tensão normal elevada o valor da tensão tangencial de pico é superior para as saliências que apresentam uma inclinação de  $30^\circ$  e o posterior corte das asperezas implica uma maior área.

Na segunda fase dos ensaios realizados por Khosravi, Ali, *et al.* (2013), a resposta das descontinuidades é significativamente afetada pela direção de carregamento, através da redução da resistência tangencial ao longo da direção do plano da junta provocada pelo aumento do ângulo de orientação das asperezas.

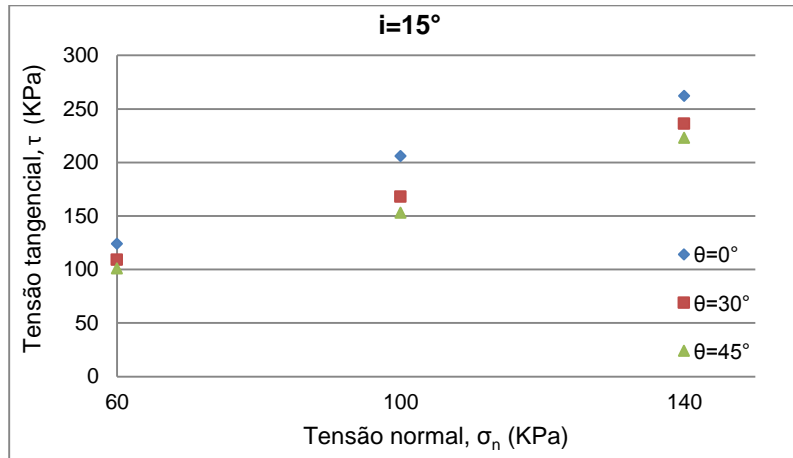


Figura 2.21 - Resultados das tensões tangenciais de pico num gráfico tensão tangencial - tensão normal para inclinação das saliências igual a 15°.

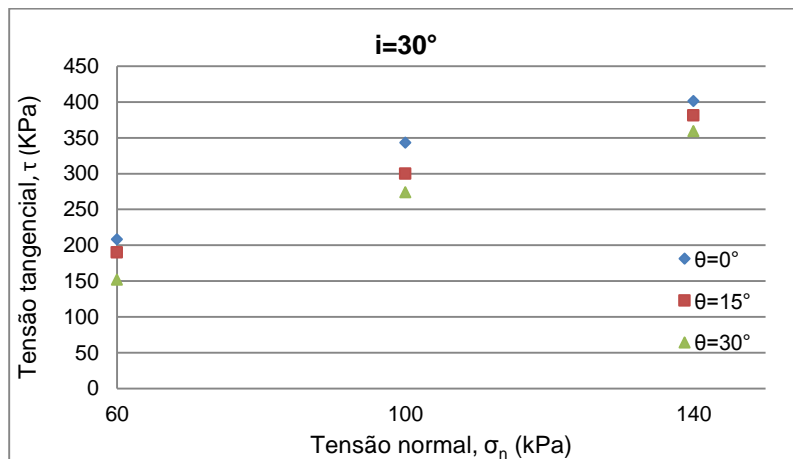


Figura 2.22 - Resultados das tensões tangenciais de pico num gráfico tensão tangencial - tensão normal para inclinação das saliências igual a 30°.

Os gráficos apresentam os resultados obtidos pelos autores nos ensaios para diferentes ângulos de inclinação e orientação das asperezas. Como se pode observar, a resistência tangencial das descontinuidades decresce com o aumento do ângulo que define a orientação das asperezas relativamente ao plano de corte.

Associado ao aumento do ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ), está uma redução do ângulo de inclinação aparente ( $i_\theta$ ), que pode ser obtida recorrendo à seguinte expressão:

$$\tan(i_\theta) = \tan(i) \cos(\theta) \quad (2.11)$$

Como é fundamentado por alguns critérios existentes, a resistência tangencial é função da inclinação das asperezas. Posto isto, associado ao aumento do ângulo que define a orientação das saliências ( $\theta$ ), está uma redução da inclinação aparente ( $i_\theta$ ), e consequentemente a diminuição da resistência tangencial das descontinuidades.

Em termos de deformabilidade, para os ensaios em que se considera um maior ângulo de orientação das asperezas o valor da dilatância é menor. Mesmo para situações de tensão normal mais baixas, o valor da dilatância é inferior ao valor da inclinação aparente da correspondente saliência. Esta situação acontece pelo facto do movimento horizontal da descontinuidade não ocorrer exatamente na direção do plano de corte, ou seja, o movimento horizontal não se dá na direção em que se considera o ângulo aparente, mas sim numa direção oblíqua que apresenta um ângulo inferior ao ângulo aparente, como ilustra a Figura 2.23.

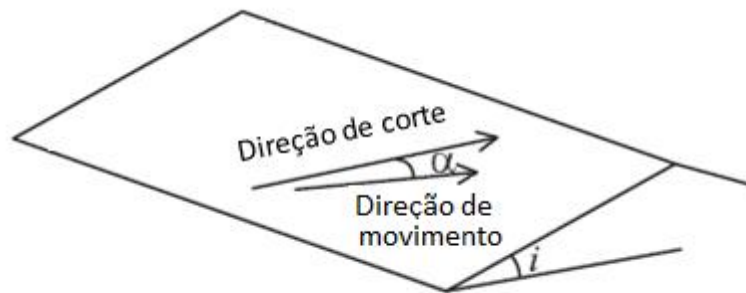


Figura 2.23 - Representação da direção do movimento para asperezas com ângulo de orientação das saliências diferente de zero (Khosravi et al. 2013).

Posto isto, o ângulo de inclinação aparente na direção de movimento pode ser definido através da seguinte expressão:

$$\tan(i_\theta) = \tan(i) \cos(\theta + \alpha) \quad (2.12)$$

Onde:

- $\alpha$  é o ângulo do movimento que corresponde ao ângulo entre a direção de corte e a direção do movimento durante o carregamento de corte.

Em suma, os estudos efetuados permitiram aos autores concluir que:

- A tensão tangencial das descontinuidades depende da direção de corte relativamente à direção das descontinuidades e da magnitude das tensões normais aplicadas;
- Um aumento do ângulo de orientação ( $\theta$ ) corresponde a uma diminuição do ângulo de inclinação aparente ( $i_\theta$ ) e consequentemente uma diminuição da resistência ao corte;
- O deslocamento lateral para este tipo de descontinuidades conduz a uma diminuição da dilatância.



# 3

## ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE E DESLIZAMENTO

### 3.1 INTRODUÇÃO

Como foi explicado anteriormente, o comportamento mecânico de um maciço rochoso é fortemente condicionado pela presença de descontinuidades, em especial quando a resistência ao corte destes planos é inferior à da matriz rochosa envolvente.

Posto isto, é necessária a realização de ensaios que analisem as propriedades que condicionam a deformabilidade e resistência das descontinuidades, bem como a magnitude e os movimentos da mesma, para que possa ser compreendido ou previsto o comportamento mecânico global do elemento (Goodman 1989).

As propriedades acima referidas podem ser obtidas de duas formas:

- Pela observação de geólogos ou engenheiros geotécnicos que, de acordo com a sua experiência e julgamento, selecionam os valores que lhe parecem razoáveis para as propriedades das descontinuidades;
- Recorrendo a ensaios laboratoriais ou *in situ* para a determinação das propriedades em causa.

Como se pode compreender com facilidade, o segundo método apresenta uma maior exatidão, sendo as observações visuais técnicas preteridas em relação aos ensaios; excetuando os casos onde não é possível a obtenção de boas amostras (Goodman 1989).

Relativamente aos ensaios realizados *in situ*, que como o próprio nome indica são ensaios realizados em campo, devem efetuar-se nas condições naturais do maciço rochoso, isto é, todas as propriedades da rocha e das descontinuidades devem apresentar-se como se encontram na Natureza. Em alternativa a estes, utilizam-se os ensaios laboratoriais onde se ensaiam amostras retiradas de sondagens ou amostras em que todas as características e propriedades da descontinuidade são reproduzidas com a maior precisão possível.

A escolha do método de medição da resistência tangencial a aplicar em determinada situação depende da natureza do problema em estudo, dos recursos disponíveis, do tempo e do dinheiro que foi disponibilizado para a resolução do problema (Hoek and Bray 1999).

Os ensaios de resistência ao corte e deslizamento de descontinuidades rochosas permitem a obtenção da relação tensão-deslocamento, e a quantificação da resistência ao corte de pico e residual de uma determinada junta. De um modo geral, os ensaios de resistência tangencial de uma descontinuidade baseiam-se na aplicação de uma força normal e outra tangencial. Com o incremento da segunda, ocorre

translação horizontal de um dos blocos; deslocamento tangencial. As tensões normais e tangenciais aplicadas são deduzidas a partir da divisão das respectivas forças pela área da superfície da junta em que se encontram aplicadas.

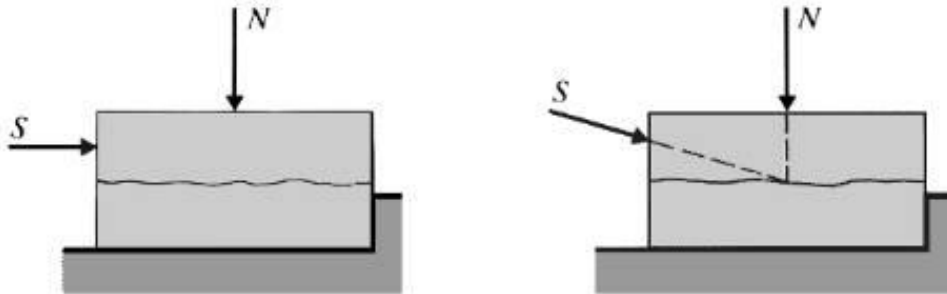


Figura 3.1 - Configuração do ensaio de resistência ao corte (Brady and Brown 2004).

Na Figura 3.1 apresenta-se o esquema representativo do ensaio de corte. Como se pode observar, uma das metades da amostra é impedida de se deslocar, enquanto a outra metade é submetida a um carregamento na direção do plano (força de corte  $S$ ) e outro na direção normal ao plano (força normal  $N$ ). Esta é a configuração geral de um ensaio de resistência ao corte, porque propicia a ocorrência de deslocamentos pelo plano da descontinuidade. É de notar que o carregamento responsável pelas tensões tangenciais poderá apresentar inclinação de forma a evitar a rotação de um dos blocos da amostragem em relação ao outro.

Neste capítulo serão abordados os métodos e os instrumentos usados na medição da resistência tangencial das descontinuidades, feita através de ensaios laboratoriais e de campo. Será também descrito o material disponível na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) para a análise deste parâmetro e posteriormente apresentados alguns exemplos de provetes ensaiados com a caixa de corte. Entendeu-se que seria fundamental esta abordagem pelo facto do modelo estudado ao longo da presente dissertação ter por base as condições impostas pela caixa de corte presente na FEUP.

### 3.2 ENSAIOS *IN SITU*

Os ensaios *in situ*, executados no local onde se pretende efetuar o estudo, podem ser realizados por equipamentos portáteis ou por equipamentos fixos, dependendo a sua escolha das características e exigências das descontinuidades e do projeto em análise.

A Figura 3.2 ilustra o instrumento fixo para ensaios de corte direto realizado *in situ*. Com este equipamento é possível fazer análises a provetes com dimensões em larga escala, superiores às ensaiadas em laboratório, variando entre  $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$  e  $1 \times 1 \text{ m}^2$ . Este ensaio pode ser aplicado na superfície do maciço ou numa galeria subterrânea e está dividido em duas fases:

- Aplicação de uma carga normal à descontinuidade sobre o bloco. Esta carga permanece constante ao longo do ensaio;
- Progressivo incremento de carga tangencial até se atingir a rotura do bloco a favor do plano de descontinuidade, sendo medida a magnitude da carga e dos deslocamentos tangenciais e normais.

Pela análise da Figura, observa-se que a carga normal é aplicada recorrendo a um macaco hidráulico e é repartida ao longo de uma chapa de aço. Relativamente à tensão tangencial, esta também é aplicada através de um macaco hidráulico com uma determinada inclinação, de acordo com as características geológicas e mecânicas da discontinuidade. Na generalidade dos casos, os ensaios *in situ* realizam-se em galerias onde é mais fácil encontrar pontos de apoio para equipamentos de atuação hidráulica.

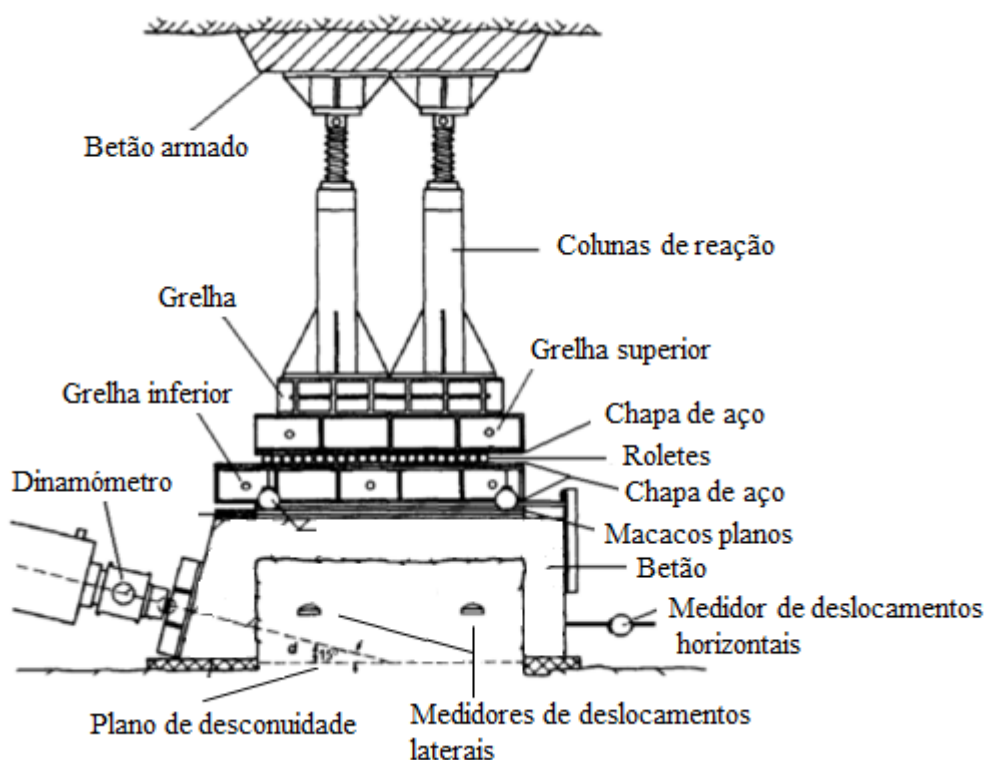


Figura 3.2 - Esquema representativo do ensaio da máquina fixa de resistência ao corte *in situ* (ISRM 1974a)

A aplicação deste método implica que sejam ensaiadas três ou quatro amostras, sendo que em cada um dos ensaios é aplicado um valor de tensão normal constante diferente. Os resultados obtidos representam-se através de um gráfico tensão tangencial *versus* tensão normal onde cada ensaio corresponde a um ponto. A partir da curva formada por estes pontos é possível obter-se uma aproximação ao valor da coesão e do ângulo de atrito da discontinuidade.

Contudo, a sua aplicação torna a quantificação da resistência ao corte da discontinuidade extremamente dispendiosa pelo facto de envolver um grande número de recursos e de o ensaio se realizar em larga escala. Assim sendo, a sua utilização apenas se justifica em projetos de grandes dimensões com condições geotécnicas adversas.

Em alternativa ao ensaio de corte direto *in situ* apresentado, é possível efetuar o ensaio através de uma máquina de corte portátil (Ross-Brown and Walton 1975). O instrumento em causa encontra-se esquematizado na Figura 3.3 e a aplicação desta máquina contempla os seguintes passos:

1. A amostra da rocha que contém a descontinuidade é cortada de acordo com as dimensões do molde da máquina de corte. De seguida, as duas partes da rocha separadas pela descontinuidade são ligadas entre si e retiradas cuidadosamente para prevenir deslocamentos ao longo da superfície de descontinuidade, sendo colocadas num molde de gesso ou betão.

2. De seguida, o molde é colocado na máquina de corte para se proceder ao ensaio. Este inicia-se com a aplicação de uma tensão normal de baixo valor para prevenir deslocamentos do provete. Os fios de ligação das duas metades da amostra são cortados.
3. Nesta fase a amostra está preparada para o ensaio, iniciando-se este com o gradual aumento da tensão normal até atingir os valores estabelecidos para o ensaio. De seguida, o valor da tensão normal mantém-se constante e é aumentada a tensão tangencial, sendo registado o deslocamento durante a aplicação desta.
4. Assim que a resistência de pico é ultrapassada, o deslocamento continua a ser permitido e é encontrado um valor mais baixo de tensão tangencial para que continue a haver movimento.
5. Por restrições de movimento, para a determinação da tensão de corte residual é necessário que a tensão normal seja libertada e a metade superior do provete seja recolocada na posição inicial.
6. Neste tipo de ensaio, o carregamento aplicado na amostra é medido e posteriormente dividido pela área da descontinuidade para se obter a tensão normal e tangencial. Deve-se determinar a área inicial por medição direta e, posteriormente, deve calcular-se a redução da área de superfície com o deslocamento ocorrido.

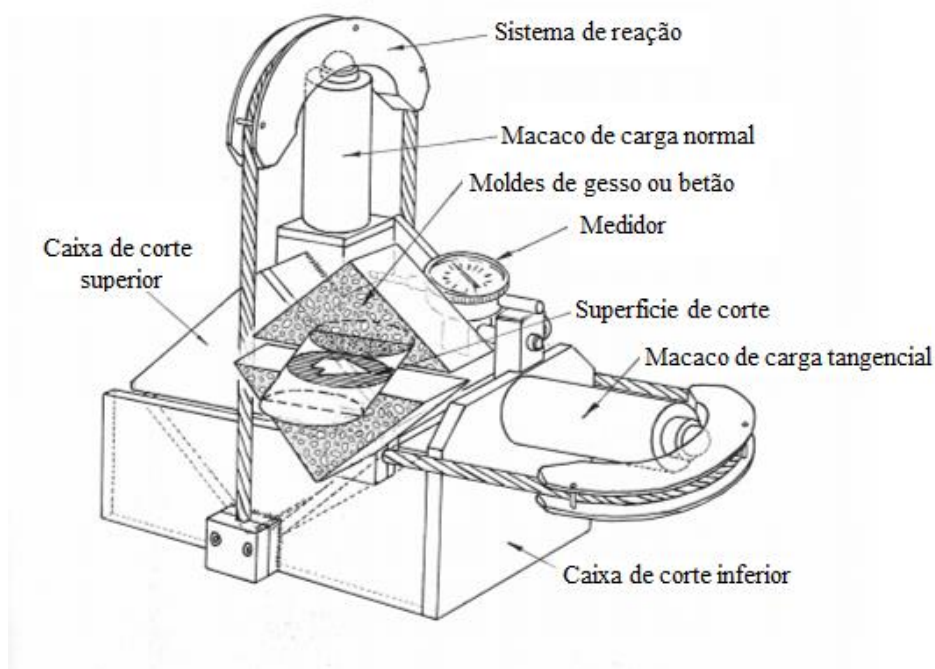


Figura 3.3 - Esquema representativo dos elementos que compõem a máquina de resistência ao corte portátil (Hoek and Bray 1999).



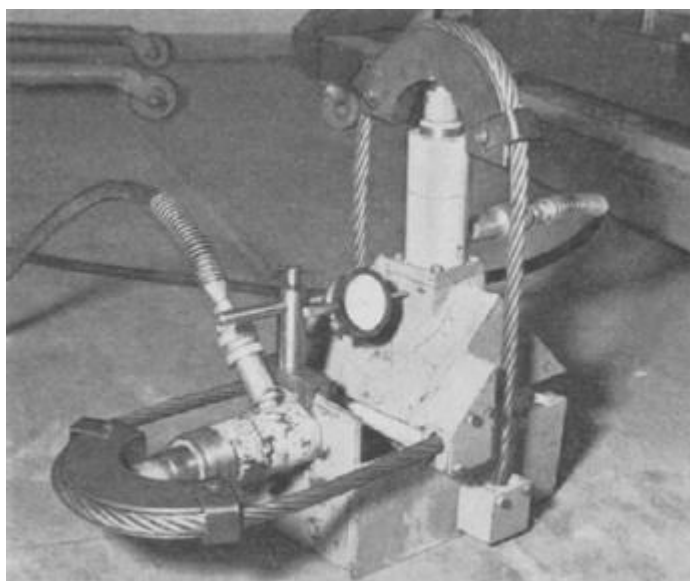


Figura 3.4 - Máquina de resistência ao corte portátil. (Ross-Brown and Walton 1975)

Este instrumento portátil, apesar de possibilitar a obtenção de informação de forma imediata, apenas permite ensaios para baixos valores de tensões normais e de corte. É de notar que alguns destes aparelhos não efetuam a medição de deslocamentos produzidos na amostra. Apresenta ainda desvantagens relativas à dimensão das amostras que permite analisar, uma vez que os provetes preparados para este instrumento têm a dimensão de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Em suma, torna-se difícil testar rugosidades que sejam representativas da discontinuidade recorrendo a este método (Hoek and Bray 1999).

Para a realização de ensaios *in situ* são necessárias condições específicas para aceder às discontinuidades e retirar as amostras sem que ocorram perturbações, o que confere elevada complexidade a este tipo de ensaios

### 3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS

Em alternativa aos ensaios *in situ* existem os ensaios laboratoriais, que tal como os anteriormente mencionados medem a resistência tangencial de pico e a residual, em função da tensão normal e de um plano de corte.

Neste tipo de ensaios, as amostras obtidas em campo podem ser conseguidas através da perfuração de um largo diâmetro, de forma a retirar uma porção de rocha que contenha o plano da discontinuidade, como se encontra representado na Figura 3.5(a). Outra solução para a obtenção destas amostras é moldar a superfície da discontinuidade através de um líquido, que funciona como scanner das irregularidades presentes na junta, Figura 3.5(b). Desta forma, obtém-se a geometria da discontinuidade permitindo moldar em gesso ou cimento os blocos superior e inferior do provete a analisar, como se apresenta na Figura 3.5(c) (Goodman 1989).

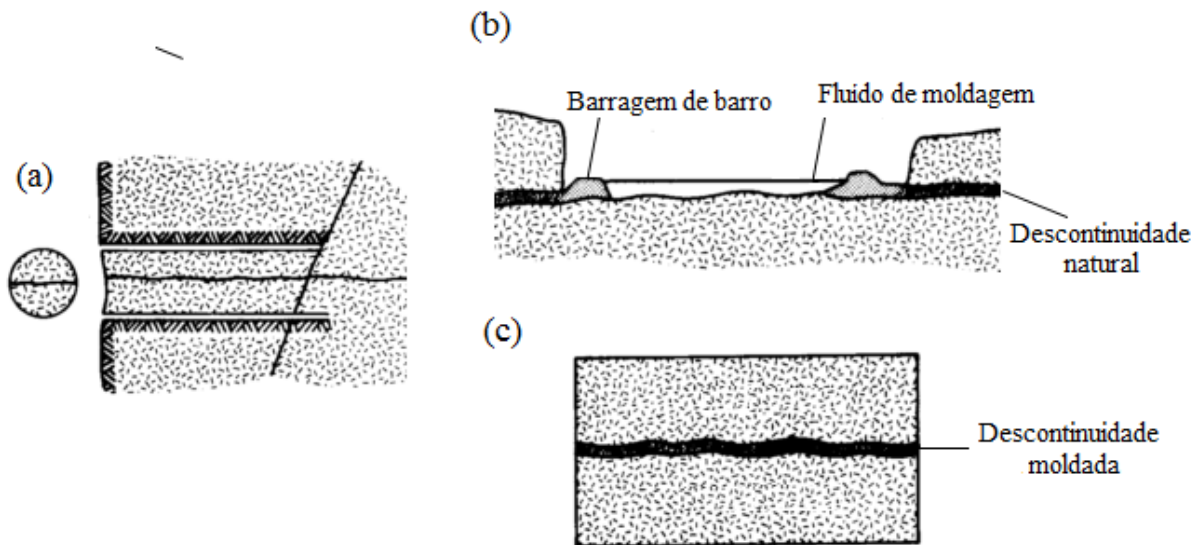


Figura 3.5 - Representação dos métodos de obtenção de amostras para o ensaio de resistência ao corte. (a)- extração de uma amostra; (b) - moldagem de uma descontinuidade; (c) - amostra com a descontinuidade moldada em gesso ou em cimento (Goodman 1989).

Relativamente à geometria da amostra para a realização deste ensaio, o ISRM sugere 3 parâmetros:

- a superfície da descontinuidade em análise deve ter uma área mínima de 2500 mm<sup>2</sup>;
- a altura de encabeçamento de cada um dos blocos superior e inferior deve ser superior a 20% do comprimento da amostra;
- a altura entre a superfície da descontinuidade e o início do encabeçamento deve ser superior ou igual a 5 mm.

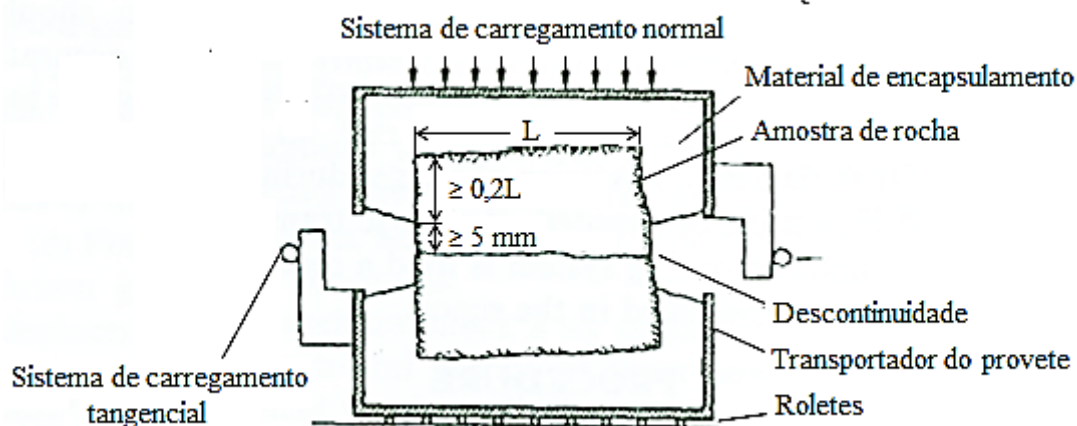


Figura 3.6 - Esquema representativo da caixa de corte para o ensaio laboratorial (ISRM 1974b).

Os ensaios laboratoriais de resistência ao corte para uma determinada descontinuidade podem ser divididos em duas fases. A primeira corresponde à obtenção das amostras, realizada no local onde está inserida a descontinuidade. A segunda diz respeito ao ensaio de resistência ao corte realizado em laboratório. Posto isto, de acordo com o ISRM, seguem-se os seguintes procedimentos para a execução do mesmo:

1. Medição das características de orientação (dip/dip direction) e outras geologicamente relevantes para o estudo da descontinuidade;
2. Corte e extração do bloco que contém a amostra, através de métodos que minimizem não só as perturbações da amostra como as variações do teor em água. Para preservar a integridade mecânica do elemento, utiliza-se uma ligação de fio ou fita entre os blocos separados pela descontinuidade que deve ser deixada até ao momento imediatamente antes do ensaio;
3. De seguida, o provete é montado na caixa de corte direto (Figura 3.6) e são preparados todos os aparelhos de medição que fazem parte da máquina do ensaio de deslizamento. É de notar que a direção da montagem do provete deve ser escolhida em função do plano de maior fraqueza para a massa rochosa;
4. Incremento da tensão normal até ao valor especificado para um determinado ensaio e registo do deslocamento resultante da consolidação;
5. Aplicação da tensão tangencial e medição dos deslocamentos. A aplicação desta tensão pode ser efetuada por incrementos, no entanto, para controlo da taxa de deslocamentos é aplicada de forma contínua. Devem ser efetuadas pelo menos dez medições antes de se atingir a tensão de pico;
6. Após ser atingida a resistência de pico obtém-se a tensão residual, quando, sob tensão normal constante, são obtidos cinco valores de tensão tangencial muito próximos para deslocamentos elevados;
7. Finalizado o ensaio, o plano de corte deve ser completamente descrito e a área da superfície de corte medida.

De forma a garantir o menor desvio de resultados possível, a determinação da tensão tangencial deve ser efetuada recorrendo a pelo menos cinco ensaios em que cada provete é testado com tensão normal com diferentes valores, mas constante ao longo de cada ensaio (ISRM 1974b).

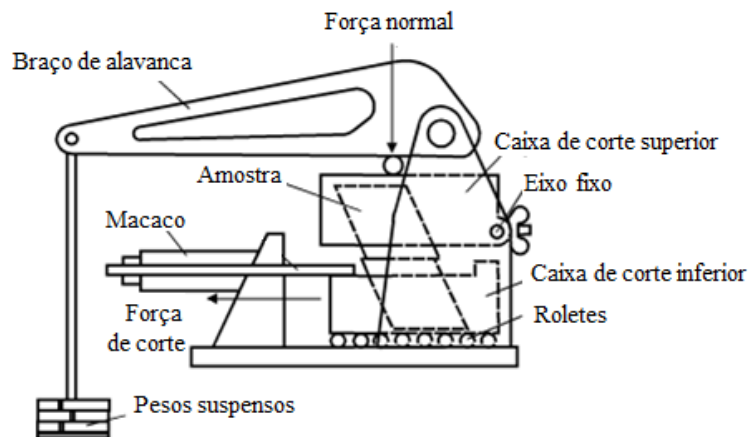


Figura 3.7 - Esquema representativo da máquina de ensaio laboratorial de resistência ao corte direto (Hoek 2000).

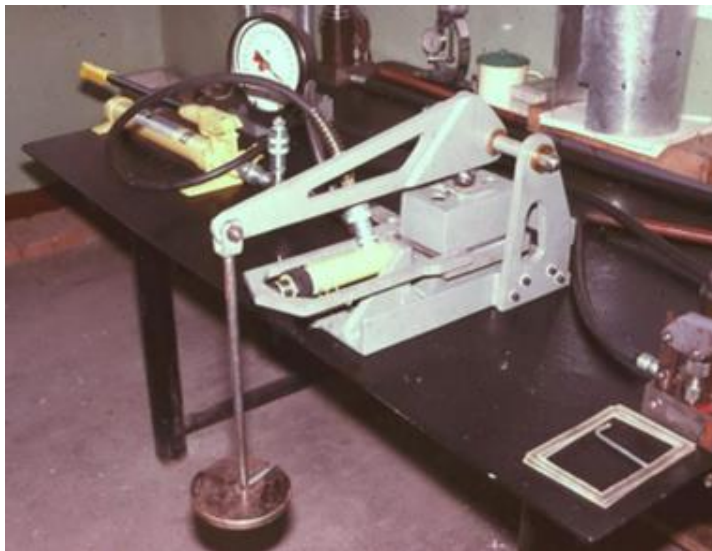


Figura 3.8 - Máquina de ensaio laboratorial de resistência ao corte (Hoek 2000).

Na Figura 3.7 encontra-se esquematizada a máquina utilizada para a realização do ensaio de resistência ao corte, bem como a indicação dos elementos mais importantes que a compõem. Logo após é apresentada uma fotografia real do equipamento, Figura 3.8.

Com este equipamento a tensão normal é mantida constante ao longo de todo o ensaio, através do braço da alavanca. Este é um aspeto relevante pois em ensaios cuja tensão normal é aplicada com o recurso a sistemas hidráulicos ou pneumáticos, é difícil manter constante este parâmetro, dificultando a interpretação dos resultados (Hoek 2000).

### 3.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE

Ao longo do presente capítulo, compreendeu-se que para a realização de um ensaio de resistência ao corte é necessária a aplicação de duas cargas. Uma carga normal ( $N$ ) que permanece constante, e outra

tangencial ( $S$ ) que aumenta progressivamente ao longo do ensaio. Assim sendo, para se obter os valores de tensão que estes carregamentos aplicam no plano de descontinuidade é necessário o conhecimento da área da descontinuidade. Os valores das tensões são obtidos de acordo com as expressões seguintes:

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \quad (3.1)$$

$$\tau = \frac{S}{A} \quad (3.2)$$

No decorrer do ensaio são medidos os valores das forças de corte aplicadas e os deslocamentos tangenciais e normais. Esta medição permite a obtenção de gráficos tensão-deslocamentos tangenciais. Recorrendo a estas curvas representativas do comportamento do material é possível a obtenção dos valores  $\tau_{\text{pico}}$  e  $\tau_{\text{residual}}$ . O valor de  $\tau_{\text{pico}}$  corresponde ao valor máximo atingido no ensaio, a partir do qual os deslocamentos passam a ser muito elevados para pequenas variações de tensão. Por sua vez, o valor de  $\tau_{\text{residual}}$  é o valor estabilizado de tensão para o qual os deslocamentos continuam a ocorrer depois de se atingir o valor de tensão de pico.

No caso de descontinuidades lisas ou planas sem preenchimento, para uma tensão normal constante, obtém-se um gráfico tensão-deslocamento tangenciais como o apresentado na Figura 3.9. Como se pode observar, quando se atinge um determinado instante, para pequenos incrementos de tensão de corte, ocorrem deslocamentos tangenciais muito grandes.

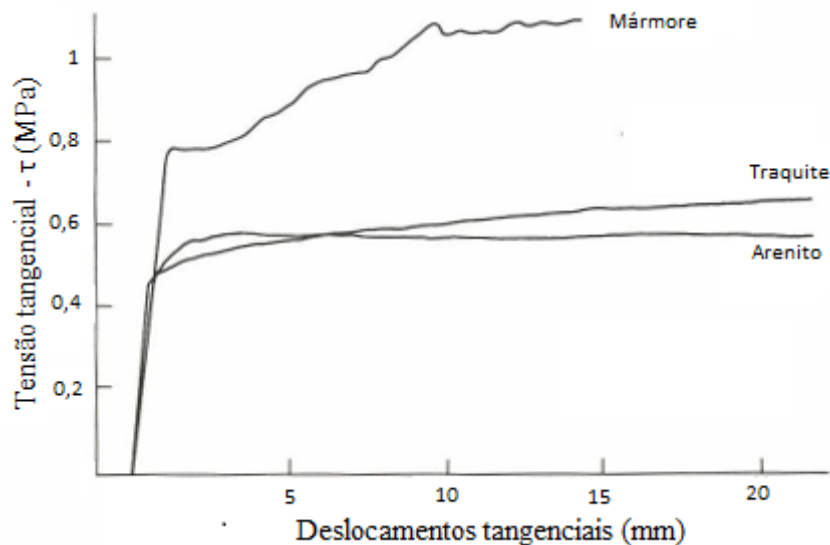


Figura 3.9 - Curvas de tensão tangencial-deslocamento tangencial para vários materiais sobre tensão normal constante igual a 1.0 MPa (Hoek and Brown 1997).

O valor da tensão de corte de pico caracteriza a envolvente de rotura do material para o valor de tensão normal ensaiada, ou seja, quando se repete o ensaio para diferentes valores de tensões normais

obtem-se a envolvente de rotura do material. Para descontinuidades lisas e polidas, a envolvente pode ser descrita pela equação de Mohr Coulomb. Na Figura 3.10 encontra-se esquematizado o ajuste linear da envolvente de rotura, num gráfico tensão tangencial-tensão normal para três ensaios.

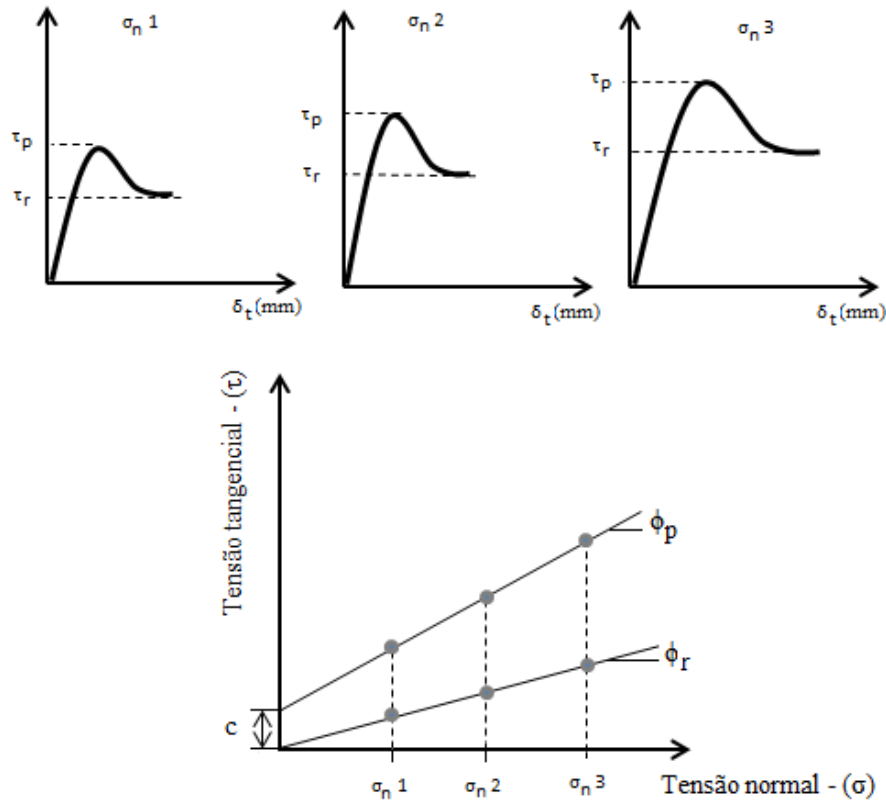


Figura 3.10 - Esquema da obtenção de uma curva de tensão tangencial-tensão normal com base em 3 ensaios de resistência ao corte.

O ajuste da curva tensão tangencial-tensão normal permite o cálculo dos parâmetros resistentes: coesão e ângulo de atrito, quer de pico, quer residual. A inclinação da envolvente corresponde ao ângulo de atrito ( $\phi$ ) e o valor da coesão ( $c$ ) é representado pela interseção com o eixo das ordenadas.

Relativamente a descontinuidades que apresentam rugosidade na sua superfície, o comportamento registado é diferente. A tensão de pico é atingida para baixos valores de deslocamento tangencial. Posteriormente, os deslocamentos continuam a aumentar com a redução da tensão tangencial até se atingir um valor estabilizado de tensão, tensão residual. A este valor estão associados diferentes parâmetros de resistência.

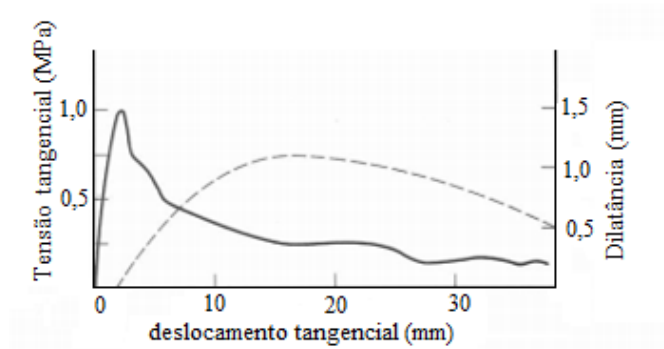


Figura 3.11 - Gráficos tensão-deslocamento tangencial (curva contínua) e dilatância-deslocamento tangencial (curva tracejada) para uma descontinuidade com rugosidade sob tensão normal constante igual a 1.5 Mpa (Hoek and Brown 1997).

Importa ainda referir que para ensaios em descontinuidades com rugosidade, ocorrem deslocamentos perpendiculares ao plano de descontinuidade. Esta situação deve-se ao facto de ser necessário ultrapassar as rugosidades para que ocorram deslocamentos tangenciais (González de Vallejo 2002). Este fenómeno encontra-se representado pelo gráfico deslocamento tangencial-dilatância na Figura 3.11.

### 3.5 ENSAIOS DE CORTE E DESLIZAMENTO DE JUNTAS DA FEUP

#### 3.5.1 EQUIPAMENTO

No laboratório de geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto encontra-se um protótipo do equipamento de laboratório para ensaios de corte e deslizamento de juntas. Este equipamento foi concebido na FEUP e tem sido desenvolvido tendo em vista um aumento da sua rigidez, precisão e automatização.

O equipamento ostenta 5 m de comprimento, 2 m de largura e 1.5 m de altura. A sua dimensão e estrutura de montagem conferem ao equipamento uma elevada rigidez. Na conceção, o autor do equipamento optou por alinhar segundo o mesmo eixo o moto-variador elétrico, o parafuso sem fim, as rótulas esféricas, a célula de tração-compressão e a caixa de corte, o que justifica o seu grande comprimento.

A caixa de corte do aparelho pode conter uma amostra até 150 mm de altura e uma área máxima de  $200 \times 200 \text{ mm}^2$ . É de notar que as dimensões das amostras são coincidentes com as dimensões da caixa de corte apenas em casos específicos. Na generalidade dos casos, as juntas naturais são recolhidas em sondagens com uma forma cilíndrica pelo que, para a realização deste ensaio, é necessário o encabeçamento das duas partes em blocos de cimento, garantindo que a descontinuidade coincide com o plano médio da caixa de corte.



Figura 3.12 - Caixa de corte do equipamento de laboratório de ensaio de resistência ao corte da FEUP (Menezes 2006) .

Este equipamento possui transdutores de elevada precisão que permitem a medição de deslocamentos horizontais, na caixa inferior, e verticais, na caixa superior. A colocação estratégica dos transdutores na caixa superior permite a avaliação não só da dilatação, como de eventuais rotações que possam ocorrer na parte superior da amostra durante o ensaio.

A força vertical é aplicada à amostra por um atuador hidráulico e a força horizontal é aplicada através do movimento do parafuso sem fim. Pelo facto do deslizamento ser imposto de forma mecânica é possível garantir um movimento horizontal constante no tempo. Assim, na condição de deslocamento horizontal muito lento, é favorecida a avaliação dos parâmetros mecânicos em condições estáticas.

Todo o sistema encontra-se ligado a um computador que controla os procedimentos mecânicos e hidráulicos e permite a obtenção da informação relativa às células de carga, aos transdutores de deslocamentos e à velocidade de rotação. Também de forma eletrónica é garantida a segurança do dispositivo.

### 3.5.2 ENSAIOS

Para se efetuar a ligação com o presente trabalho, considerou-se fundamental fazer referência a ensaios efetuados com o equipamento de corte e deslizamento de juntas existente na FEUP.

Como será abordado no capítulo 4, o presente trabalho refere-se à simulação numérica de ensaios de resistência ao corte e deslizamento com as dimensões da caixa de corte do equipamento, Figura 3.12.

As descontinuidades que foram modeladas numericamente neste trabalho possuem rugosidade definida por saliências, rugosidade “dente de serra”. Nestas condições geométricas já foram efectuados alguns ensaios laboratoriais com o equipamento presente na Faculdade (Dumbliauskaite 2006).





Figura 3.13 - Provete com rugosidade “dente de serra” submetido ao ensaio de resistência ao corte  
(Dumbliauskaite 2006).

A Figura 3.13 é um exemplo de um provete de 5 saliências que foi submetido ao ensaio de resistência ao corte e deslizamento no laboratório da FEUP que apresenta uma junta com geometria semelhante às modeladas.



# 4

## MODELOS NUMÉRICOS

### 4.1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa um estudo detalhado do comportamento mecânico relativo ao deslizamento em juntas com um tipo de rugosidade geometricamente definida. O estudo poderia ser efetuado com o recurso a ensaios físicos laboratoriais. Em alternativa, ou por complementação destes, poderá efetuar-se uma abordagem computacional deste tipo de problemas. A presente dissertação está inserida nesta abordagem computacional através da criação de modelos numéricos de juntas.

De modo que todas as características do modelo em estudo pudessem ser analisadas em simultâneo e no contexto global do elemento, utilizou-se o *software* de cálculo automático que se considera mais adequado para a abordagem do problema, Phase2.

No presente capítulo será inicialmente efetuada uma breve abordagem ao método no qual se baseiam as análises com recurso ao *software* indicado que utiliza o método dos elementos finitos. Ainda numa fase introdutória será referido de forma sucinta o funcionamento do *software*.

Para melhor compreensão do leitor, a apresentação da modelação e das análises numéricas efetuadas encontra-se dividida em dois estágios:

- O primeiro é referente à apresentação e caracterização geral do modelo onde serão inseridas diferentes descontinuidades, contemplando as definições de projeto, geometria, propriedades dos materiais, malha de elementos finitos e condições fronteira.
- De seguida serão abordados separadamente os modelos de dois tipos de juntas: lisa e rugosa. Nesta fase serão descritas as características geométricas e morfológicas de cada junta, bem como as metodologias aplicadas para a criação e análise de cada modelo.

#### 4.1.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O *software* adotado para a investigação em causa tem por base a aplicação do método dos elementos finitos de forma automatizada. Por este motivo considerou-se importante uma breve abordagem deste método.

Na atualidade, o método dos elementos finitos é o melhor e mais usado método para a previsão do comportamento estrutural. Este método permite uma previsão com fiabilidade dos deslocamentos e tensões a que uma estrutura pode estar sujeita. Posto isto, compreende-se a utilidade deste método em análises geotécnicas, por se tratar do estudo de um elemento de elevada complexidade.

A aplicação do método pode sintetizar-se considerando os seguintes passos:

1. Divisão de um modelo físico em pequenas porções, subdivisão. Estes elementos são tratados de forma individual e com formulação própria.
2. Definição do elemento por funções que caracterizam a variação das incógnitas no interior do elemento em função da variação nodal. Assim sendo, pode obter-se uma maior aproximação da solução numérica dum meio contínuo aumentando o grau das funções de interpolação, ou diminuindo a dimensão dos elementos, aumentando o número de elementos que compõem o global.
3. Formulação das equações. Existem diferentes métodos para a formulação das equações, no entanto qualquer método conduz à equação elementar que rege o comportamento de um sistema solicitado por um conjunto de forças exteriores:

$$[K]\{q\} = \{Q\} \quad (4.1)$$

Onde:

- $[K]$  é a matriz rigidez;
  - $\{q\}$  é o vetor deslocamentos;
  - $\{Q\}$  é o vetor das forças nodais.
4. Determinação da matriz de rigidez global. Para cada elemento que constitui a estrutura obtém-se uma equação do tipo 4.1, e a combinação destas equações conduz ao sistema que rege o comportamento da estrutura. Neste método a estrutura é mantida contínua, sendo imposta a compatibilidade de deslocamentos nos pontos nodais em elementos adjacentes.
  5. Determinação das incógnitas do problema. Na formulação de um problema de métodos de deslocamentos, as incógnitas são os deslocamentos nodais, a partir dos quais são determinadas as tensões e deformações.

(Fortunato 1994)

#### 4.1.2 PROGRAMA PHASE 2

O Phase2, ou RS2 (nova denominação), foi desenvolvido pela *Rocscience* em conjunto com a universidade de Toronto. Este *software* permite a análise do comportamento de maciços rochosos tendo por base um modelo bidimensional, no qual é aplicado o método dos elementos finitos. O seu vasto campo de aplicação permite que este programa seja uma poderosa ferramenta de trabalho em projetos de Engenharia, sendo muito utilizado na análise de escavações, estabilidade de taludes, consolidação, percolação, análise dinâmica e probabilística, entre outros.

O *software* em causa permite a análise da estrutura como um elemento em meio elástico, em que cada elemento resiste aos esforços nele atuantes independentemente da resistência de pico definida, ou em meio plástico onde as tensões, quando são superiores à resistência de pico, sofrem uma redistribuição para elementos vizinhos. Após a ocorrência da plastificação, passam a atuar sobre o elemento apenas tensões equivalentes à resistência residual. É de notar que a definição do comportamento em meio plástico é a que mais se assemelha com o comportamento dos materiais na realidade. No entanto, pelo facto de definir um comportamento não linear, a simulação do comportamento neste meio implica o

conhecimento de alguns parâmetros que nem sempre estão estabelecidos ou são do conhecimento do utilizador (Leite 2004).

Relativamente à geometria de um projeto, o *software* permite a importação de ficheiros em dxf, ficando a geometria do problema definida de acordo com o que foi desenhado com outro programa CAD. No caso em estudo, a geometria definida é relativamente simples, como tal pode ser definida com o próprio programa.

Outro aspeto de relevância que confere a este *software* grande utilidade é a possibilidade de gerar a malha de elementos finitos de forma automática. O utilizador pode escolher o tipo de malha (variável, uniforme ou radial), o tipo de elemento (triangular de 3 ou 6 nós, ou quadrilateral de 4 ou 8 nós), e o número de nós a incluir na envolvente do modelo definido de acordo com o que mais se adequa à análise do problema em questão. Após a definição destes parâmetros característicos da malha, esta é gerada automaticamente.

Ainda relativamente às potencialidades do RS2, este permite uma análise da estabilidade dos elementos usando o método de redução de resistência tangencial (*Shear Strength Reduction* -SSR). Este cálculo é totalmente automatizado e pode ser calculado de acordo com os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb ou Hoek Brown. Ao executar esta funcionalidade, o programa calcula um valor denominado *Strength Reduction Factor* - SRF. Este fator é calculado de forma iterativa até encontrar o valor de tensão tangencial correspondente ao estado crítico.

Outra valência deste *software* está relacionada com o facto de ser possível a análise por “*stages*”, ou seja, o faseamento de um projeto. A utilização desta funcionalidade implica a definição do número de estágios, bem como os valores de um ou mais parâmetros a variar em cada estágio para a simulação pretendida.

Na definição e caracterização de um modelo em Phase2, é fundamental a definição da geometria, a caracterização dos materiais constituintes e a discretização da malha, podendo ainda considerar-se a presença de água no modelo. Terminada esta caracterização, é possível a obtenção de resultados específicos em formato gráfico relativamente a qualquer variável que se pretenda analisar com maior detalhe.

As funcionalidades mencionadas anteriormente, nomeadamente o fator de redução de tensões e a análise faseada “*stages*”, foram muito explorados para a resolução do problema em causa. O fator SRF permitiu o cálculo do valor aproximado para o qual a tensão de corte pode ser aumentada ou reduzida de forma a encontrar-se a situação crítica. Relativamente ao processo de divisão em estágios, este permitiu simular os ensaios de resistência ao corte definindo para cada estágio um carregamento de corte diferente e mantendo-se a tensão normal constante.

## 4.2 APRESENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GERAL DO MODELO EM PHASE2

### 4.2.1 DEFINIÇÕES DO PROJETO

Em termos gerais, no que diz respeito às características adotadas para o projeto optou-se por definir a análise em estado plano de deformação, isto é, assume-se que o modelo apresenta um comprimento infinito na direção normal ao plano, e por conseguinte a tensão nessa direção é nula. O modelo utilizado para a resolução da matriz que representa o sistema de equações do problema foi o método de eliminação de Gauss.

Quanto à análise de tensões, utilizou-se um número máximo de 500 iterações com uma tolerância de 0.001, procurando desta forma obter a convergência do método para resultados mais fiáveis. Em contrapartida, esta opção contribuiu para alguma demora nos cálculos efetuados. Ainda relativamente à análise de tensões, foi selecionada a opção de reduzir as tensões tangenciais para o valor residual na ocorrência de rotura por tração.

As análises de sensibilidade relativas ao comportamento das descontinuidades foram realizadas com o cálculo automático do fator de redução da tensão tangencial (SRF) através de uma análise automática de diferença entre duas iterações consecutivas, com uma tolerância de 0.01.

Para as situações em que foram consideradas análises por “*stages*”, definiu-se o número de estágios pretendidos e, para cada estágio, definiu-se diferentes valores de carregamento.

#### 4.2.2 GEOMETRIA

A geometria utilizada para a análise computacional em duas dimensões foi definida tendo por base o equipamento para ensaios de corte e deslizamento de juntas da FEUP. Posto isto, a geometria definida com o *software* contempla não só o provete e as descontinuidades, mas também as chapas metálicas existentes no aparelho. As dimensões em área dos elementos são  $0,025 \times 0,07 \text{ m}^2$  e  $0,2 \times 0,025 \text{ m}^2$  para os blocos metálicos rígidos superior e laterais, respetivamente;  $0,2 \times 0,01 \text{ m}^2$  para a área onde serão introduzidas a diferentes juntas e  $0,2 \times 0,07 \text{ m}^2$  na parte superior e inferior do provete, como se apresenta na Figura 4.1.

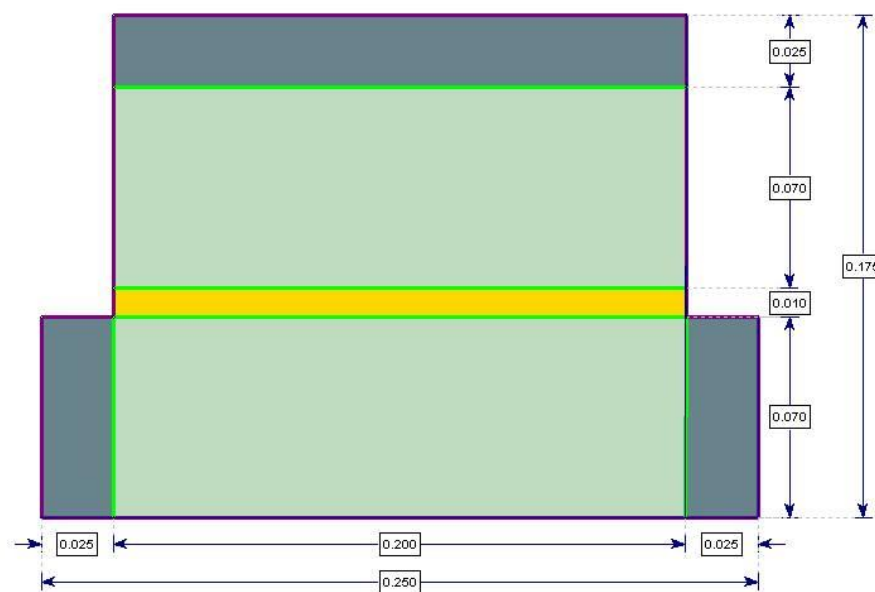


Figura 4.1 - Representação da geometria do modelo em estudo.

Como este trabalho visa a análise da resistência tangencial de diferentes descontinuidades geometricamente definidas, a Figura apresentada contém apenas a área onde será inserida a descontinuidade, situada a meia altura do provete entre os 0,07m e 0,08m, sendo que os diferentes tipos de descontinuidades analisados serão abordados mais adiante.

Aquando da definição da geometria, foi necessário caracterizar geometricamente os blocos metálicos presentes nos ensaios laboratoriais uma vez que estes têm a função de redistribuição de tensões no provete. Estes blocos metálicos estão dispostos ao longo da superfície de contacto entre os dois materiais, permitindo que as tensões exteriores aplicadas sejam distribuídas igualmente ao longo das superfícies da amostra modelada.

#### 4.2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Na definição das propriedades dos materiais foram efetuadas algumas considerações importantes, nomeadamente no que se refere aos parâmetros de resistência e deformabilidade.

Para garantir o correto efeito dos blocos metálicos de redistribuição de tensões, considerou-se um comportamento elástico para que estas não atingissem a rotura e para que o comportamento mecânico do elemento não fosse condicionado pelas mesmas. Assim sendo, na definição deste material considerou-se um módulo de Young elevado correspondente ao aço, 210000MPa.

Relativamente ao material representativo do provete, atribuiu-se um comportamento plástico e um módulo de elasticidade de 12000MPa, sendo o seu comportamento definido pelo critério de Hoek Brown. Os parâmetros mencionados foram escolhidos de forma a possibilitar a ocorrência de eventuais plastificações e roturas considerando-se os parâmetros de um gesso.

De notar ainda que, aquando da escolha do critério de rotura, escolheu-se Hoek-Brown em detrimento de Mohr Coulomb, porque este está associado a uma linearidade que não satisfaz as condições reais dos solos e para além disso sobrestima a resistência à tração da rocha, bem como a resistência para baixas tensões de confinamento (Eberhardt 2012).

Na definição dos parâmetros relativos às descontinuidades, considerou-se o critério de Mohr-Coulomb com um ângulo de atrito de 30°, resistência à tração e coesão nulas. Assim, a resistência das descontinuidades será controlada apenas pela geometria definida e pelo ângulo de atrito considerado. Ainda no que diz respeito às descontinuidades, definiu-se uma rigidez normal de 500MPa/m e rigidez tangencial de 250MPa/m.

As propriedades dos materiais e descontinuidades mencionadas e justificadas anteriormente apresentam-se nas tabelas 4.1 e 4.2, respetivamente.

Tabela 4.1 - Características gerais adotadas para os materiais do modelo.




Material Name	Color	Initial Element Loading	Elastic Type	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Cohesion (peak) (MPa)	Intact Compressive Strength (MPa)	mb (peak)	mb (residual)	s (peak)	s (residual)
Aço		None	Isotropic	210000	0.3	Mohr Coulomb	Elastic	380					
Rocha		None	Isotropic	12000	0.3	Hoek-Brown	Plastic		75	0.577	0.577	0.0007	0.0007

Tabela 4.2 - Características gerais adotadas para as descontinuidades.

Joint Name	Color	Slip Criterion	Tensile Strength (MPa)	Peak Cohesion (MPa)	Peak Friction Angle (deg)	Res. Cohesion (MPa)	Res. Tensile Strength (MPa)	Res. Friction Angle (deg)	Normal Stiffness (MPa/m)	Shear Stiffness (MPa/m)
Descontinuidade Patton		Mohr_Coulomb	0	0	30	N/A	N/A	N/A	500	250

#### 4.2.4 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Na caracterização da malha de elementos finitos, considerou-se que seria apropriado ao problema uma malha graduada com elementos triangulares de três nós. O facto da malha escolhida ser graduada permite que, aquando da discretização, esta não se distribua igualmente ao longo do modelo, sendo que existe um maior número de elementos nas proximidades da descontinuidade. Assim, os cálculos serão mais precisos nestas zonas que, possivelmente, serão as zonas mais determinantes no estudo em causa.

O parâmetro que determina a quantidade de elementos utilizados inicialmente é o número de nós nos limites exteriores, neste projeto foram escolhidos 200 nós. Posteriormente a esta definição da malha, optou-se por se fazer um aumento de densidade de elementos em zonas específicas, particularmente em zonas envolventes da descontinuidade de forma a obter-se uma malha com maior.

Na aplicação da malha procurou-se que o número de elementos fosse da mesma ordem de grandeza para as diferentes geometrias das descontinuidades definidas. Importa referir que como a malha de elementos finitos definida é graduada, seria impossível obter exatamente o mesmo número de elementos em todas as análises visto que a malha varia em função da geometria das descontinuidades. Assim, procurou-se que as malhas apresentassem uma densidade semelhante para todos os modelos.

#### 4.2.5 CONDIÇÕES FRONTEIRA

O modelo criado em Phase2 simula o ensaio de resistência ao corte realizado pela caixa de corte existente na FEUP, tendo sido necessário aplicar as condições fronteira que se verificam no ensaio de resistência ao corte e deslizamento. Por este motivo, aquando da criação do modelo em duas dimensões, impediu-se o movimento horizontal na fronteira vertical do bloco superior e o movimento vertical na base do bloco inferior.

Estas condições são impostas para os ensaios de resistência tangencial na descontinuidade porque o seu modelo propícia a ocorrência de deslizamentos pela descontinuidade que se situa entre as duas partes do provete. Posto isto, compreende-se que o modelo, de um modo geral, sofrerá em grande parte deslocamentos horizontais no bloco inferior, bem como deslocamentos verticais no bloco superior para o caso de ocorrência de dilatação.

Importa referir que, aquando da introdução de uma descontinuidade no modelo, é necessário definir as condições dos extremos da descontinuidade, ou seja, definir se as extremidades são fechadas ou abertas. No caso de serem fechadas, os movimentos relativos são impedidos nos extremos. De forma a definir-se as condições reais de um ensaio de resistência ao corte num modelo intersetado por um plano de descontinuidade, os extremos desta devem estar abertos, permitindo a ocorrência relativa de deslocamentos.

### 4.3 JUNTA LISA

Como é sabido, os processos naturais de formação e desenvolvimento das juntas levam a que estas apresentem sempre rugosidade, mesmo que aparentemente insignificante. Neste trabalho, a junta plana foi criada de forma a verificar-se a congruência dos resultados da modelação com o critério que define este tipo de descontinuidades, critério de Mohr-Coulomb.

Para esta análise, foram realizadas seis simulações de ensaios de resistência ao corte. Cada uma das simulações foi efetuada sob diferentes valores de tensão normal constante, nomeadamente 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 e 4.0 MPa. Para cada valor de tensão normal procedeu-se a um incremento da carga horizontal



aplicada através da criação de “stages”. Desta forma, simulou-se o princípio dos ensaios de resistência ao deslizamento de juntas.

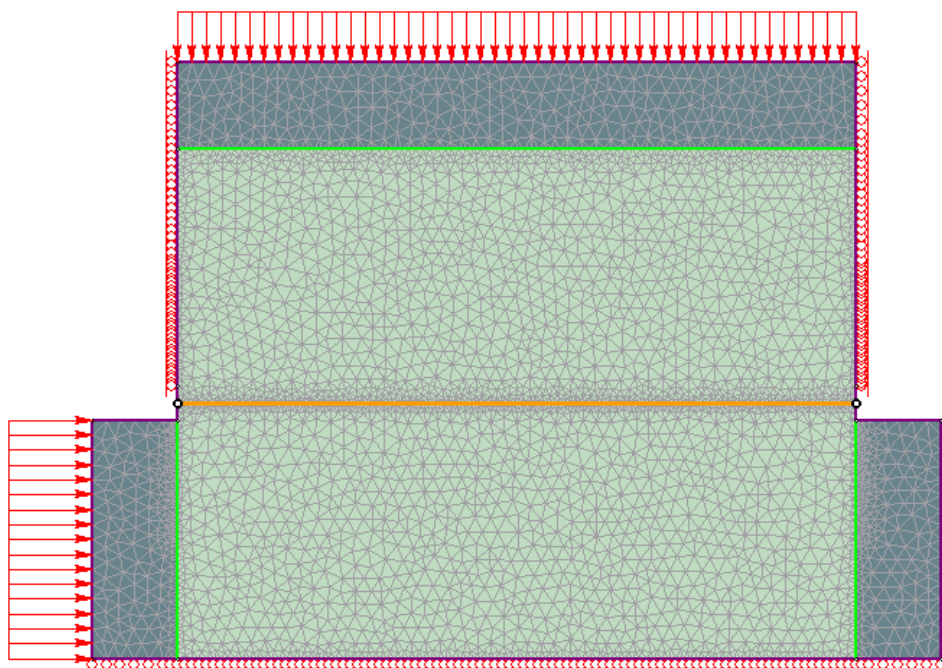


Figura 4.2 - Representação do modelo da caixa de corte com o modelo de junta lisa em Phase2.

Na Figura 4.2 apresenta-se o modelo numérico para a junta lisa com todos os parâmetros definidos, nomeadamente as condições de apoio, a malha de elementos finitos e os carregamentos normal e tangencial aplicados.

Com os resultados extraídos do programa, em especial os gráficos de tensão tangencial-deslocamento horizontal, é possível retirar o valor da tensão de corte máxima, a partir do qual os valores de deslocamento tangencial disparam. Assim, obtém-se um valor de tensão tangencial de pico ( $\tau_p$ ) para cada uma das simulações efetuadas. Com estes valores é possível definir a envolvente de rotura aproximada para a junta plana. Os valores obtidos foram comparados com a envolvente de rotura definida através do critério de Mohr Coulomb para uma descontinuidade com ângulo de atrito de  $30^\circ$ .

#### 4.4 JUNTAS COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO NORMAL AO PLANO DE CORTE

Para uma análise do comportamento das descontinuidades em função da sua geometria, foram criadas e analisadas 20 juntas com características geométricas diferentes. Os modelos desenvolvidos diferem na inclinação e número de saliências que compõem a descontinuidade.

Para melhor compreensão das características geométricas envolvidas no estudo, encontra-se na Figura 4.3 um esquema representativo das mesmas. Como se pode verificar, a variação do número de saliências e da sua respetiva inclinação implica uma variação do valor da amplitude, da largura e do seu espaçamento. Posto isto, definiram-se os modelos de análise presentes na tabela 4.3, onde se encontram as características geométricas associadas a cada junta.

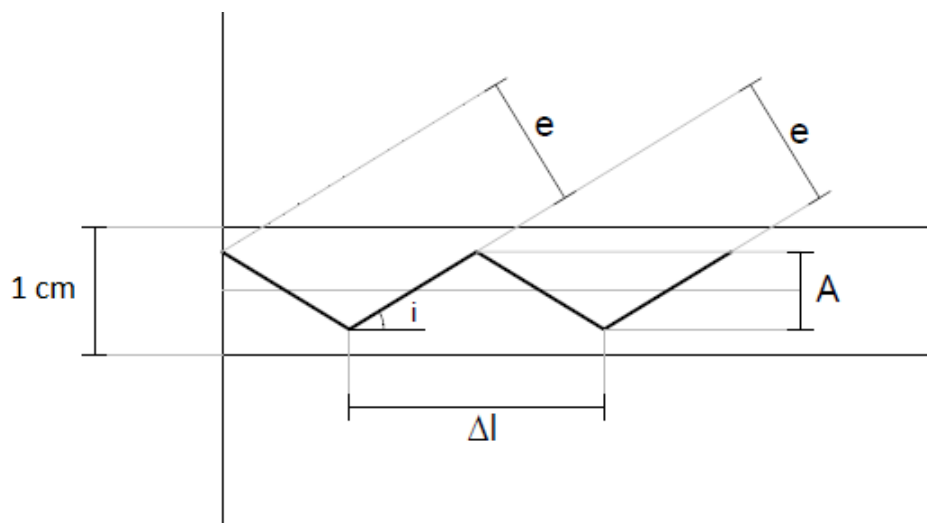


Figura 4.3 - Elementos geométricos das descontinuidades consideradas.

Tabela 4.3 - Dados relativos às descontinuidades modeladas.

Inclinação, $i$ (graus)	Número de saliências, $n$	Largura, $\Delta l$ (mm)	Amplitude, $A$ (mm)	Espaçamento entre as famílias de descontinuidades, $e$ (mm)	Orientação dip/dipdirection (graus)
20°	20	10	1.82	3.42	20/90 20/270
	10	20	3.64	6.84	20/90 20/270
	8	25	4.55	8.55	20/90 20/270
	6	33,3	6.07	14.4	20/90 20/270
	4	50	9.1	17.1	20/90 20/270
15°	20	10	1.34	2.59	15/90 15/270
	10	20	2.68	5.18	15/90 15/270
	8	25	3.35	6.47	15/90 15/270
	6	33,3	4.47	8.63	15/90 15/270
	4	50	6.7	12.94	15/90 15/270
10°	20	10	0.88	1.74	10/90 10/270
	10	20	1.76	3.47	10/90 10/270
	8	25	2.20	4.34	10/90 10/270
	6	33,3	2.94	5.79	10/90 10/270
	4	50	4.41	8.68	10/90 10/270
5°	20	10	0.44	0.87	5/90 5/270
	10	20	0.88	1.74	5/90 5/270
	8	25	1.09	2.18	5/90 5/270
	6	33,3	1.46	2.91	5/90 5/270
	4	50	2.19	4.36	5/90 5/270

Os valores da largura ( $\Delta l$ ), amplitude ( $A$ ) e espaçamento entre famílias ( $e$ ) presentes no quadro foram calculados de acordo com as seguintes expressões:

$$\Delta l = \frac{0.2}{n} \quad (4.2)$$

$$A = \tan(i) \times \frac{\Delta l}{2} \quad (4.3)$$

$$e = \Delta l \times \sin(i) \quad (4.4)$$

Importa referir que as juntas foram geometricamente definidas de forma que os vértices constituintes da descontinuidade se encontrem à mesma distância do eixo central, eixo que divide a estrutura em dois blocos de iguais dimensões. Esta distância entre os vértices e o eixo corresponde a metade do valor da amplitude, como se encontra esquematizado na Figura 4.3.

Os valores apresentados anteriormente no quadro 4.3, nomeadamente a largura das saliências ( $\Delta l$ ) e a amplitude das descontinuidades ( $A$ ), permitem o cálculo das coordenadas dos vértices que compõem as diferentes descontinuidades. Estas coordenadas são posteriormente inseridas no programa de cálculo numérico quando se cria uma descontinuidade (“*add joint*”), ficando a geometria da junta completamente definida.

Em alternativa à introdução das coordenadas geométrica, procurou-se a definição das juntas recorrendo à criação de famílias de descontinuidades. Este modelo alternativo foi criado não só para verificar o efeito das famílias de descontinuidades quando intersetadas, mas também para o cálculo de juntas com rugosidade orientada de forma oblíqua relativamente ao plano de corte, como será abordado mais adiante no presente trabalho.

A criação de duas famílias de descontinuidades com orientações (*dip/dipdirection*) e espaçamento ( $e$ ) correspondentes às saliências definidas, permitem a obtenção de um modelo geometricamente idêntico ao obtido por introdução das coordenadas. No quadro 4.3, estão apresentadas as orientações das duas famílias de descontinuidades que intersetadas permitem a obtenção de cada uma das juntas.

É de referir que para a correta definição dos modelos, é necessário que as famílias de descontinuidades sejam inseridas num material, em que a sua espessura corresponda exatamente ao valor da amplitude calculada para uma dada descontinuidade, como se apresenta na Figura 4.7.b).

Importa salientar que para a criação de famílias de descontinuidades, “*add joint network*”, o material onde estas se inserem tem de estar definido de acordo com os parâmetros do critério de Mohr-Coulomb. Assim sendo, para obter os parâmetros de Mohr-Coulomb equivalentes aos de Hoek Brown utilizados para o material da rocha, foi necessário recorrer ao *Roclab* (*software* de cálculo de parâmetros de resistência das rochas). Os parâmetros de Mohr-Coulomb equivalentes ao material da rocha encontram-se representados na tabela 4.4. De acordo com estes parâmetros, apresentam-se na Figura 4.4 as envolventes de rotura para cada um dos critérios. As envolventes representadas a azul e vermelho correspondem ao critério de Mohr-Coulomb e Hoek Brown, respetivamente.

Tabela 4.4 - Parâmetros dos critérios de rotura obtidos com recurso ao *Roclab*.

Critério de Hoek Brown		Critério de Mohr Coulomb	
mb	0.577	Coesão	2.529MPa
s	0.0007	$\phi$	22.1°

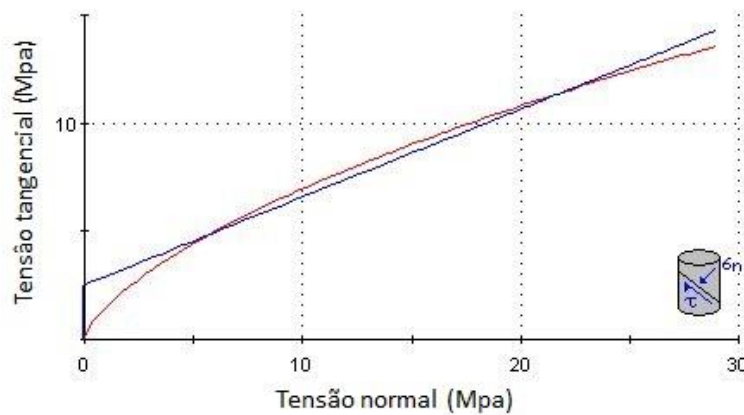


Figura 4.4 - Representação das envolventes de rotura para os critérios de Hoek Brown e Mohr Coulomb.

Como foi visto, a criação das famílias de descontinuidades implica a definição da orientação das mesmas, bem como o espaçamento entre cada família. Para a caracterização da orientação utilizou-se a opção “*use trace plane*” e inseriu-se os valores *dip/dipdirection*, que são os ângulos correspondentes ao mergulho ( $\beta$ ) e à direção de mergulho ( $\alpha$ ), respetivamente, como se apresenta na Figura 4.5. Posto isto, sabe-se que o valor do mergulho corresponde ao valor da inclinação  $i$  e que o valor da direção do mergulho será 90 para uma família e 270 para a outra. Na última coluna da tabela 4.3 encontram-se os valores considerados para as orientações de cada família de descontinuidades.

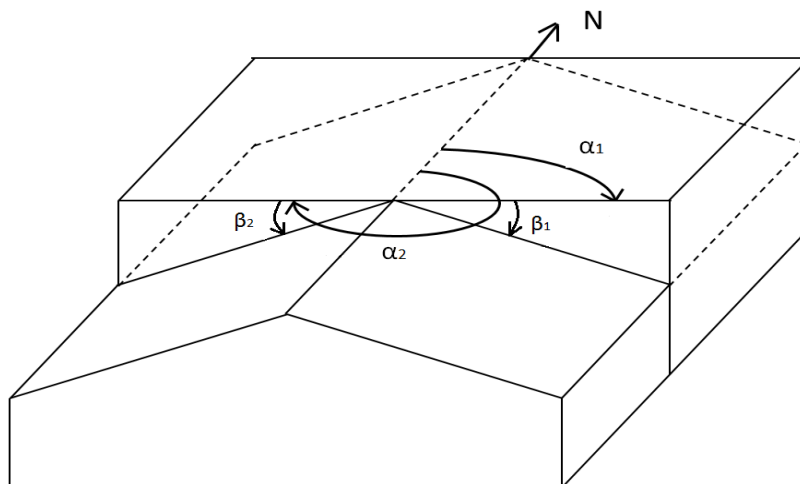


Figura 4.5 - Esquema representativo da orientação das duas famílias de descontinuidades.

Ainda na caracterização das duas famílias de descontinuidades, definiu-se o espaçamento (distância perpendicular entre planos de descontinuidades paralelos) e as coordenadas iniciais de cada família.

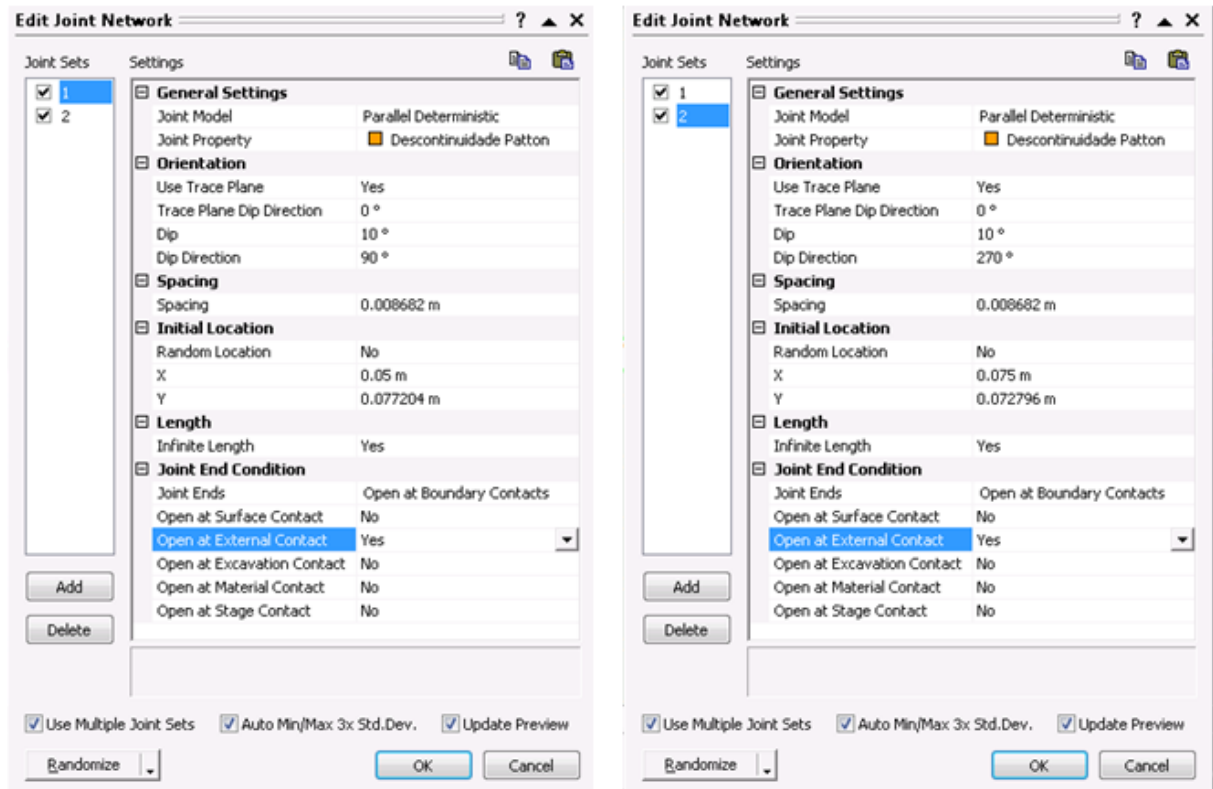


Figura 4.6 - Representação da introdução das características das duas famílias de descontinuidades no *software* para  $i=10^\circ$  e  $n=4$ .

É de referir ainda que, no caso das juntas definidas pelo cruzamento de duas famílias de descontinuidades para uma determinada amplitude, é necessário que todas as interseções entre descontinuidades se encontrem fechadas (impedidos os deslocamentos relativos) e que as extremidades se encontrem abertas (deslocamentos relativos permitidos). Desta forma são garantidas as ligações do cruzamento entre as famílias das descontinuidades, assumindo um comportamento como um único elemento.

A Figura 4.7 apresenta uma correspondência entre as duas soluções de modelação mencionadas para a mesma descontinuidade. Esta geometria é referente à descontinuidade com quatro saliências e inclinação igual a 10 graus, definida segundo as coordenadas dos vértices (Figura 4.4.a) e pelas interseções de duas famílias de descontinuidades (Figura 4.4.b).

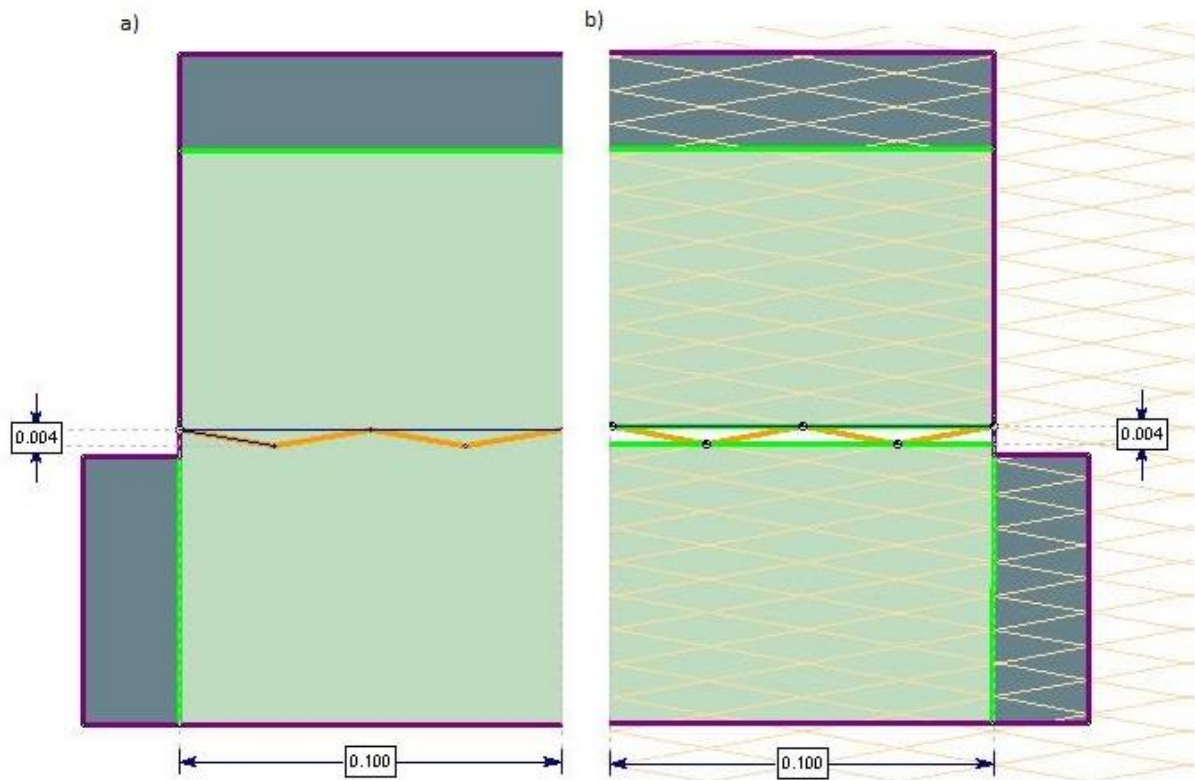


Figura 4.7 - Representação das duas modelações possíveis para a mesma descontinuidade: a) definição das coordenadas geométricas dos vértices; b) criação de duas famílias de descontinuidades.

Como o presente trabalho incide essencialmente na influência geométrica das juntas na resistência ao deslizamento das mesmas, considerou-se que também seria importante verificar a influência da sua posição horizontal na resistência ao deslizamento das juntas. Para isso modelaram-se as descontinuidades apresentadas na tabela 4.3, mas com a sua posição afetada de um deslocamento horizontal de  $\Delta l/2$ , Figura 4.8, apresentando simetria relativamente às descontinuidades anteriormente apresentadas.

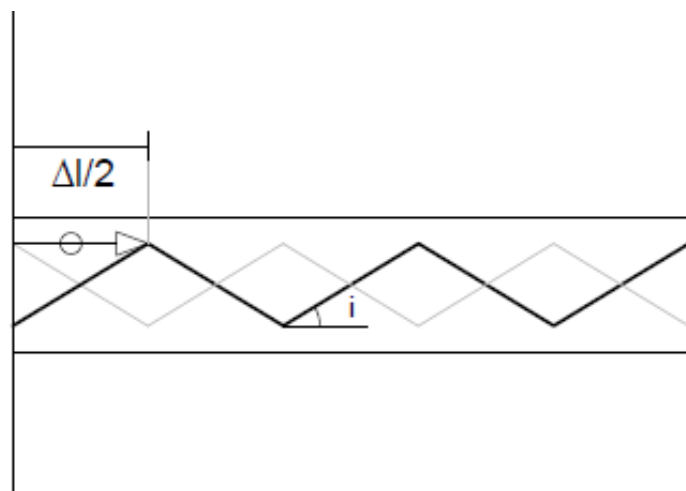


Figura 4.8 - Translação de  $\Delta l/2$  (junta simétrica).

Com as características apresentadas, os três modelos (junta definida por coordenadas geométricas, junta criada pela interseção de duas famílias e junta simétrica) foram comparados entre si através dos valores de fatores de redução de tensões obtidos com recurso ao *software* e ao cálculo analítico.

#### 4.5 JUNTAS COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO OBLÍQUA AO PLANO DE CORTE

A orientação de uma família de descontinuidades é caracterizada por um ângulo que define a inclinação das asperezas e por outro relativo à direção de mergulho. No caso de se tratar de juntas com rugosidade orientada perpendicularmente ao plano de corte (Figura 4.9.a), a direção de mergulho que caracteriza as duas descontinuidades toma os valores de  $90^\circ$  e  $270^\circ$ . Para situações em que a orientação da rugosidade não é perpendicular ao plano de corte (Figura 4.9.b) o valor da direção de mergulho fica afetado por um ângulo correspondente ao ângulo de orientação da rugosidade. Assim, à direção de mergulho que caracteriza as descontinuidades com o plano da junta perpendicular ao plano de corte é somado o valor do ângulo que define a orientação das asperezas,  $\theta$ .

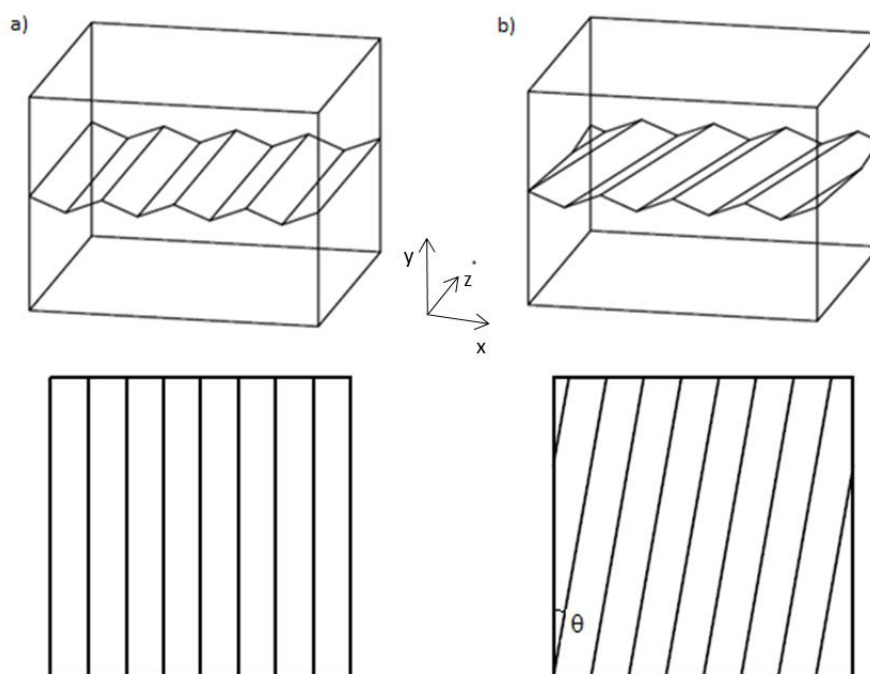


Figura 4.9 - a) Rugosidade com orientação perpendicular ao plano de corte; b) Rugosidade com orientação oblíqua relativamente ao plano de corte.

Para se efetuar esta análise, é importante compreender que a consideração de um ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ) implica uma alteração na inclinação aparente da descontinuidade ( $\alpha$ ), ou seja, o valor do ângulo que a descontinuidade apresenta na vista bidimensional xy não corresponde ao ângulo da inclinação da descontinuidade, dado que o valor do ângulo de inclinação das asperezas é medido na direção perpendicular ao seu desenvolvimento em z.

Assim sendo, é necessário calcular o ângulo que se representa na vista bidimensional xy, designado por ângulo de inclinação aparente, que permite verificar se as famílias de descontinuidades foram corretamente introduzidas.

Para melhor compreensão do processo de cálculo efetuado, apresenta-se um esquema que facilita a determinação do ângulo de inclinação aparente, que se encontra representado no modelo aquando da definição da orientação das descontinuidades.

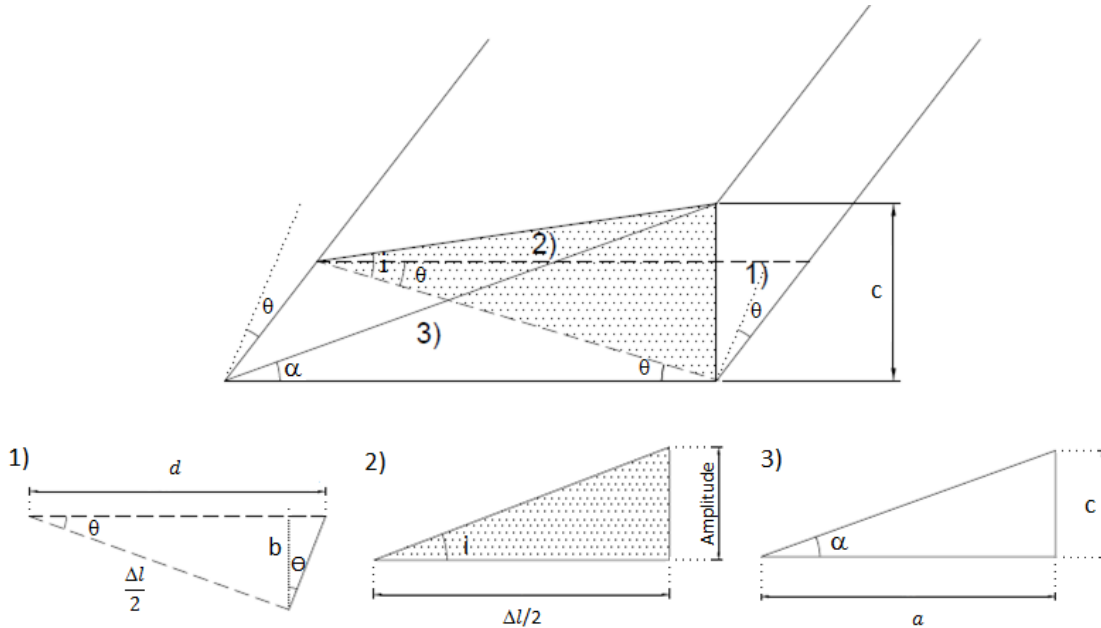


Figura 4.10 - Processo de cálculo do ângulo  $\alpha$  apresentado na vista de frente.

Na Figura 4.10 encontram-se representados os três ângulos influentes:

- Ângulo de orientação das asperezas  $\theta$ ;
- Ângulo de inclinação da descontinuidade  $i$ ;
- Ângulo de inclinação aparente  $\alpha$ .

Simplificando as expressões trigonométricas, o ângulo de inclinação aparente ( $\alpha$ ) pode ser calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\tan i}{\cos \theta}}{\tan \theta^2 + 1} \right) \quad (4.5)$$

Para a quantificação da influência do ângulo de orientação das rugosidades, presentes na superfície de descontinuidade na resistência ao corte e deslizamento das juntas, fez-se variar o ângulo  $\theta$  entre 0 e 50 graus.

Para cada uma destas situações foi necessário calcular o espaçamento das descontinuidades, bem como definir o valor de mergulho e a direção do mesmo. Na tabela seguinte apresentam-se as características utilizadas na caracterização das famílias de descontinuidades consideradas.



Tabela 4.5 - Características adotadas para a definição de orientação das asperezas.

Ângulo de inclinação das asperezas, $i$ (graus)	Ângulo de orientação das asperezas, $\theta$ (graus)	Largura aparente "a" (mm)	Ângulo de inclinação aparente, $\alpha$ (graus)	Espaçamento entre famílias de descontinuidades, $e$ (mm)	Dip/ DipDirection das duas famílias
20	0	16,7	20	11,4	20/90 20/270
	10	16,9	19,72	11,42	20/100 20/280
	20	17,7	18,88	11,48	20/110 20/290
	30	19,2	17,5	11,57	20/120 20/300
	40	21,8	15,58	11,69	20/130 20/310
	50	25,9	13,17	11,81	20/140 20/320
15	0	16,7	15	8,627	15/90 15/270
	10	16,9	14,78	8,636	15/100 15/280
	20	17,7	14,13	8,661	15/110 15/290
	30	19,2	13,06	8,70	15/120 15/300
	40	21,8	11,6	8,749	15/130 15/310
	50	25,9	9,77	8,80	15/140 15/ 320
10	0	16,7	10	5,788	10/90 10/270
	10	16,9	9,85	5,791	10/100 10/280
	20	17,7	9,41	5,8	10/110 10/290
	30	19,2	8,68	5,81	10/120 10/300
	40	21,8	7,69	5,825	10/130 10/310
	50	25,9	6,47	5,84	10/140 10/320
5	0	16,7	5	2,905	5/90 5/270
	10	16,9	4,92	2,906	5/100 5/280
	20	17,7	4,5	2,906	5/110 5/290
	30	19,2	4,33	2,908	5/120 5/300
	40	21,8	3,83	2,91	5/130 5/310
	50	25,9	3,22	2,912	5/140 5/ 310

Os valores da largura aparente ( $a$ ), foram calculados de acordo com a seguinte expressão:

$$a = \frac{\frac{\Delta l}{2}}{\cos(\theta)} \quad (4.6)$$

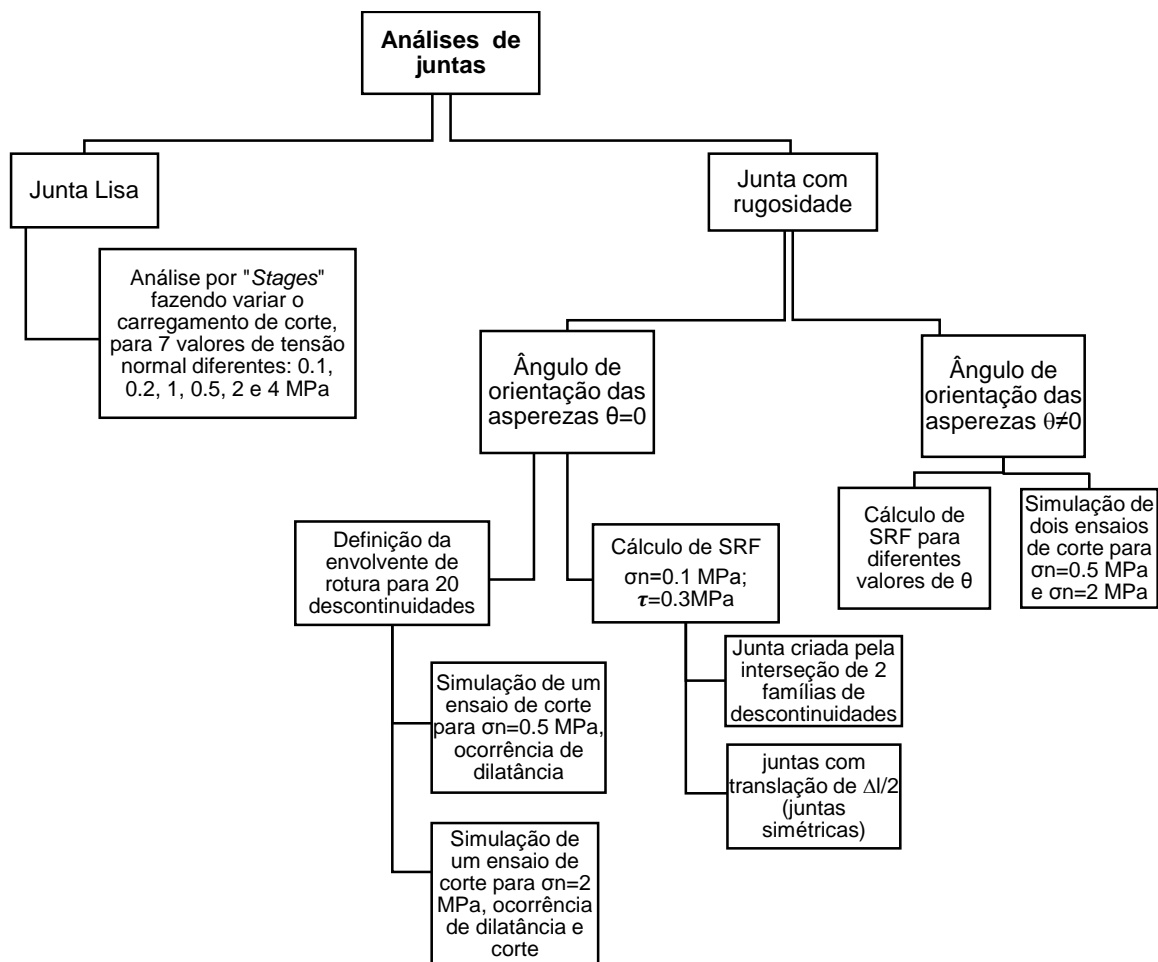
De forma a verificar-se a influência da variação do ângulo de orientação da rugosidade, utilizou-se o cálculo automático do fator de redução de tensões para uma tensão normal de 0.1 MPa e uma tensão horizontal aplicada no bloco inferior do modelo de 0.3 MPa. Em função dos resultados de SRF é possível verificar a influência do ângulo  $\theta$  na resistência ao corte das juntas.

# 5

## ANÁLISE PARAMÉTRICA

### 5.1 ASPETOS GERAIS

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos com a modelação numérica exposta anteriormente. O diagrama que se apresenta de seguida pretende esquematizar as análises que foram efetuadas de forma a facilitar a apresentação e compreensão dos resultados.

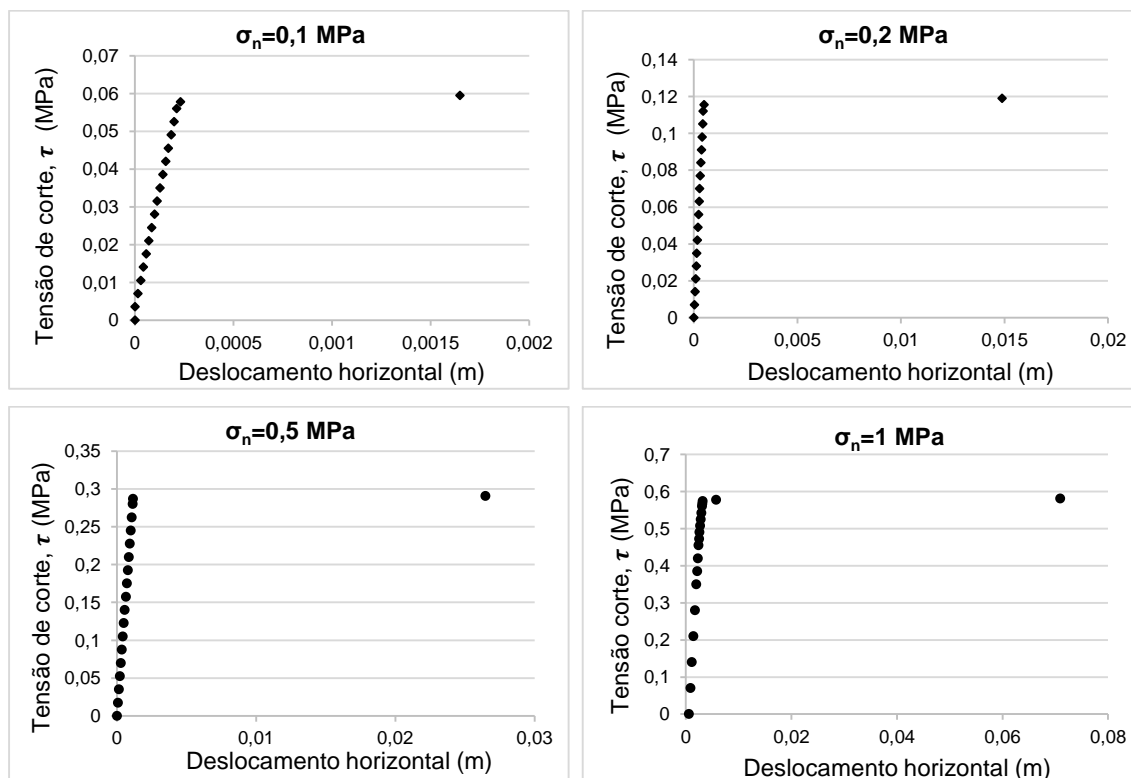


Como se pode observar, as análises foram divididas em dois tipos de juntas: Junta plana e Juntas com rugosidade. O comportamento resistente e deformacional das juntas planas foi analisado recorrendo à análise por “*Stages*” para seis valores diferentes de tensão normal. Relativamente às juntas com rugosidade estas dividiram-se em dois grupos distintos consoante a consideração ou não do ângulo de orientação das asperezas. Para a análise sem consideração deste ângulo, definiu-se a envolvente de rotura para 20 descontinuidades com diferentes inclinações e número de asperezas. Ainda na análise de juntas com o plano de corte perpendicular ao plano da junta, efetuou-se o cálculo automático de SRF para as juntas definidas por coordenadas geométricas, para as juntas criadas pela interseção de duas famílias e para as juntas simétricas, com uma tensão normal de 0.1 MPa e uma tensão tangencial de 0.105 MPa. Para a simulação de juntas com plano de corte oblíquo relativamente ao plano de junta, efetuou-se uma variação do ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ) entre  $0^\circ$  e  $50^\circ$  e calculou-se o valor de SRF para uma tensão normal e tangencial igual a 0.1 e 0.105 MPa, respetivamente.

## 5.2 JUNTA LISA

A análise da junta lisa contempla a simulação de seis ensaios de resistência ao corte. Em cada um dos ensaios definiu-se o valor de tensão normal aplicada e aumentou-se carregamento perpendicular ao plano de descontinuidade por aplicação de estágios.

As capacidades do *software* permitiram que, para cada ensaio realizado, fossem extraídos os resultados dos deslocamentos horizontais na parte inferior do provete, decorrentes dos incrementos de carregamento horizontal. Os gráficos apresentados referem-se à tensão tangencial, já que a carga horizontal aplicada foi dividida pela área da descontinuidade.



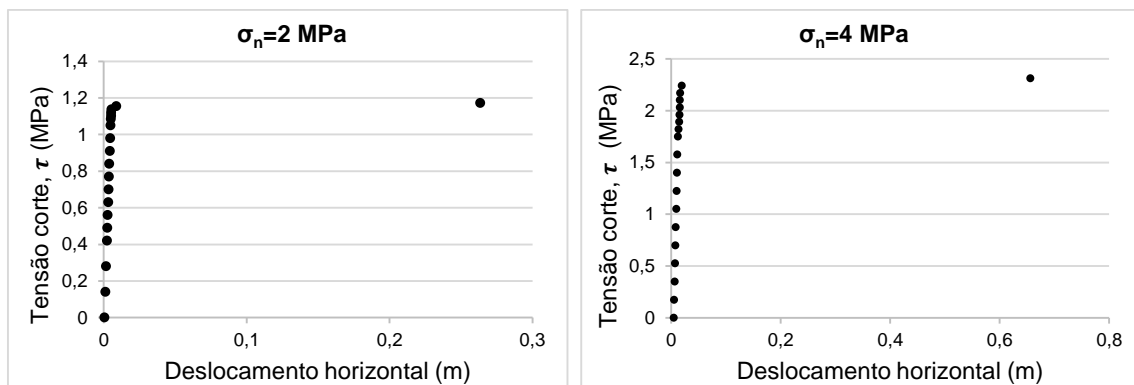


Figura 5.1 - Gráficos tensão de corte ( $\tau$ )–deslocamento horizontal obtidos com recurso ao Phase2 para cada valor de tensão normal ( $\sigma_n$ ) constante.

Numa primeira análise à Figura anterior, é de notar que os gráficos obtidos apresentam escalas diferentes. Esta disparidade é justificada pelo facto da rotura da descontinuidade ocorrer para diferentes valores de tensão tangencial máxima em função da tensão normal aplicada, e associados a estes valores de tensão estão deslocamentos com grandezas diferentes.

Os incrementos de tensão horizontal aplicados em cada “stage” não são constantes, tendo-se efetuado menores incrementos nas proximidades da tensão tangencial máxima obtida analiticamente.

Recorrendo aos gráficos de tensão tangencial-deslocamento horizontal, é possível obter-se o valor de tensão tangencial de pico ( $\tau_p$ ) para cada tensão normal aplicada. Este valor corresponde ao valor de tensão de corte máxima para o qual a partir deste os deslocamento aumentam em grande escala. A resistência tangencial máxima obtida para uma dada tensão normal constante corresponde a um ponto da envolvente de rotura. Posto isto, serão apresentados os seis pontos obtidos e comparados com a envolvente de rotura teórica de Mohr-Coulomb.

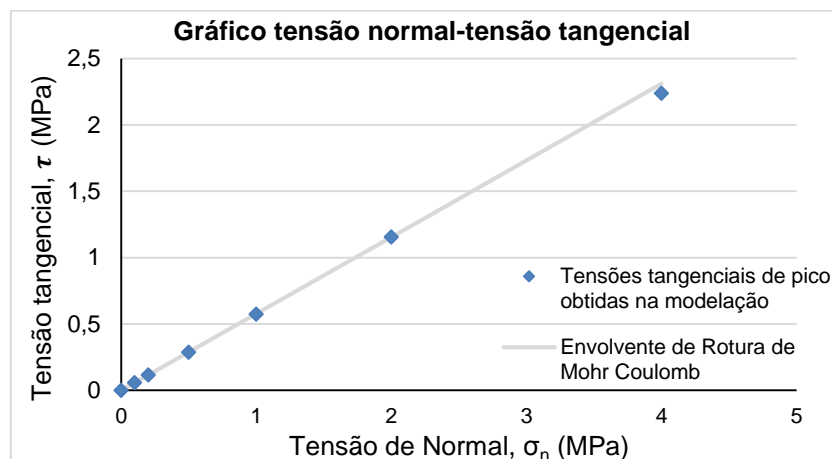


Figura 5.2 - Gráfico comparativo de resultados obtidos com recurso à modelação e a envolvente teórica de Mohr-Coulomb.

Como se pode observar por comparação entre as curvas apresentadas, os valores obtidos na modelação são muito próximos dos teóricos sugeridos pela equação de Mohr-Coulomb que definem a envolvente de rotura para uma descontinuidade com um ângulo de atrito igual a  $30^\circ$  e coesão nula.

### 5.3 JUNTAS COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO PERPENDICULAR AO PLANO DE CORTE

#### 5.3.1 ENVOLVENTES DE ROTURA

No capítulo 2, foi efetuado uma abordagem relativamente aos critérios de resistência das descontinuidades. Como as descontinuidades com rugosidade adotadas para a realização da modelação apresentam uma rugosidade de “dente de serra”, os resultados da modelação foram comparados com o critério de Patton (1996), apresentado em 2.4.3.

De acordo com este critério, o aumento da inclinação das asperezas presentes na superfície de uma junta contribui para o incremento da sua resistência ao corte para baixas tensões normais, que é definida pela primeira reta do critério. No entanto, para tensões normais mais elevadas a equação que define a envolvente de rotura altera-se, deixando a inclinação das saliências de ser influente na resistência ao corte das juntas (segunda reta do critério bi-linear).

Para os modelos estudados, a Figura 5.3 representa o comportamento teórico expectável. O completo traçado das curvas de Patton só será possível quando conhecida a tensão normal que corresponde à mudança de comportamento mecânico, representada pelo ponto A.

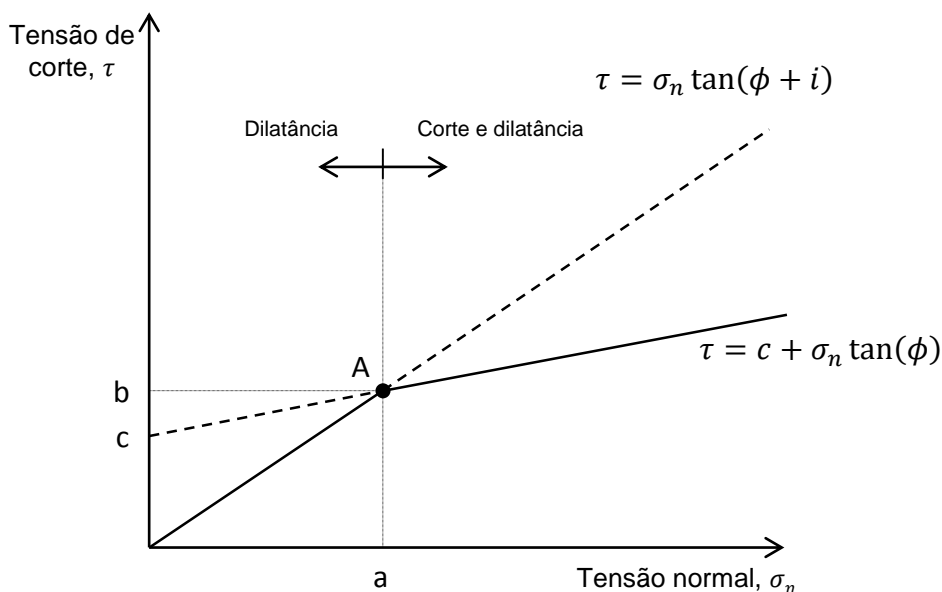


Figura 5.3. - Representação esquemática da bilinearidade de Patton, equações que definem a envolvente.

Relativamente ao gráfico apresentado, para tensões normais inferiores ao valor “a”, ocorrem deslizamentos tangenciais provenientes da capacidade de serem ultrapassadas as saliências presentes na superfície das juntas sem que ocorra o corte das mesmas. Estas condições conduzem à ocorrência de rotura por dilatância, confirmada através de deslocamentos verticais do bloco superior na direcção ascendente.

Para valores de tensão superiores a “a” ocorre corte das saliências presentes na superfície da junta seguindo-se a ocorrência de dilatância. Para esta situação a equação teórica que define o comportamento da junta deixa de considerar o valor do ângulo de inclinação  $i$ , pelo facto deste deixar de existir perante a ocorrência de corte. Assim, a envolvente passa a ter uma inclinação que apenas depende do valor do ângulo de atrito, tal como acontece para descontinuidades lisas.

Importa referir que, o valor da coesão ( $c$ ), que integra a equação da segunda reta que define a envolvente, calcula-se tendo em consideração que interseja o ponto “A” e que tem uma inclinação definida pelo ângulo de atrito ( $\phi$ ).

Para descrever e caracterizar o comportamento de cada uma das vinte descontinuidades apresentadas na tabela 4.3, definiu-se a envolvente de rotura de cada junta recorrendo ao cálculo automático do valor de *Strenght Reduction Factor*. Utilizando esta potencialidade do *software*, para uma dada tensão normal testaram-se valores de tensão tangencial de forma a obter-se o valor de carregamento de corte que permite a obtenção de um *SRF* unitário. Os carregamentos que correspondem a um fator de redução de tensões unitário definem o limite do estado de tensão que um elemento pode estar sujeito sem que ocorra rotura. As tensões tangenciais e normais que são aplicadas para se atingir este limite definem a envolvente de rotura.

Para cada uma das descontinuidades consideradas foram variados os valores de tensão normal entre 0 e 6 MPa, com um intervalo de 0.25 MPa, de forma a caracterizar-se de forma precisa a envolvente de rotura.

De seguida apresentam-se os resultados das envolventes de rotura obtidos em gráficos tensão tangencial - tensão normal para cada uma das inclinações estudadas. Cada um destes gráficos apresenta cinco casos de diferentes geometrias que variam em função do número de saliências e consequentemente a amplitude considerada.

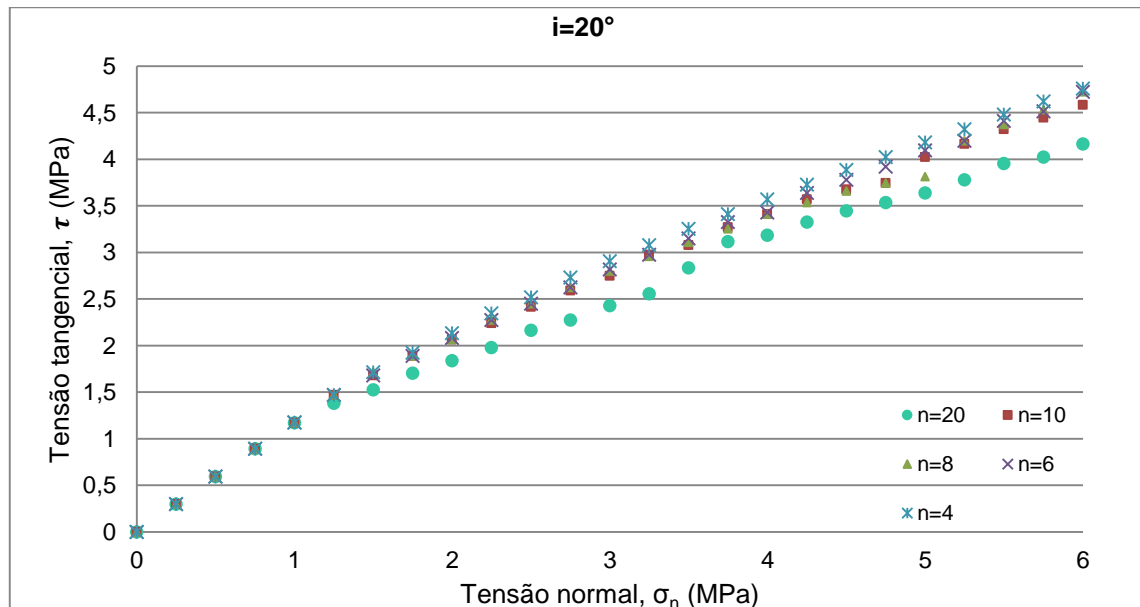


Figura 5.4 - Gráfico Tensão tangencial  $\tau$ –Tensão normal  $\sigma_n$ , obtidos na modelação para os diferentes números de saliências com  $i=20^\circ$ .

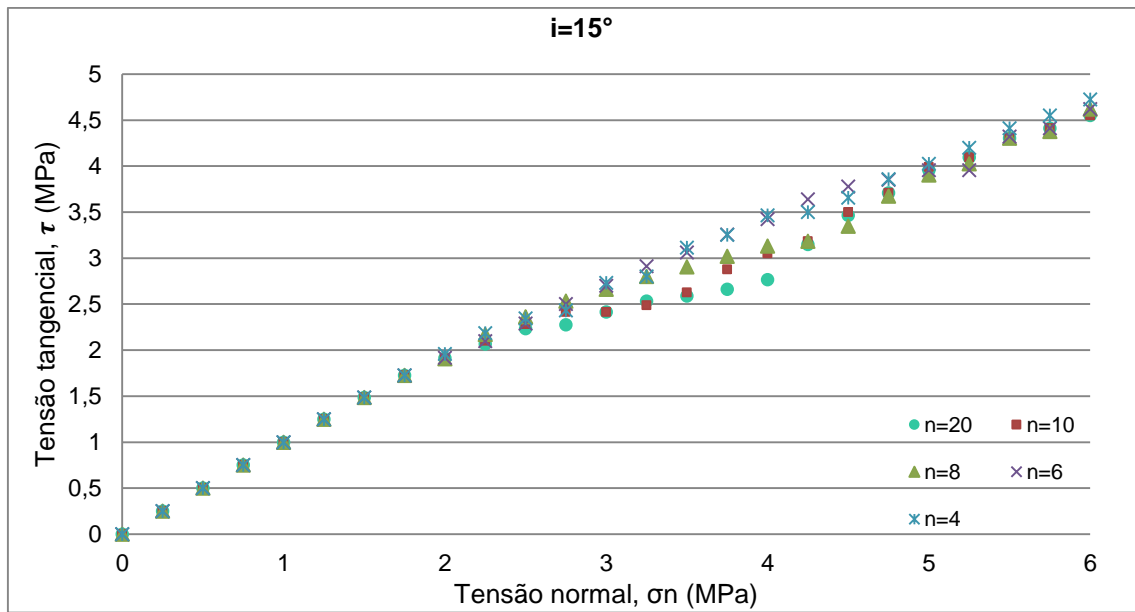


Figura 5.5 - Gráfico Tensão tangencial  $\tau$ -Tensão normal  $\sigma_n$  obtidos na modelação para os diferentes números de saliências com  $i=15^\circ$ .

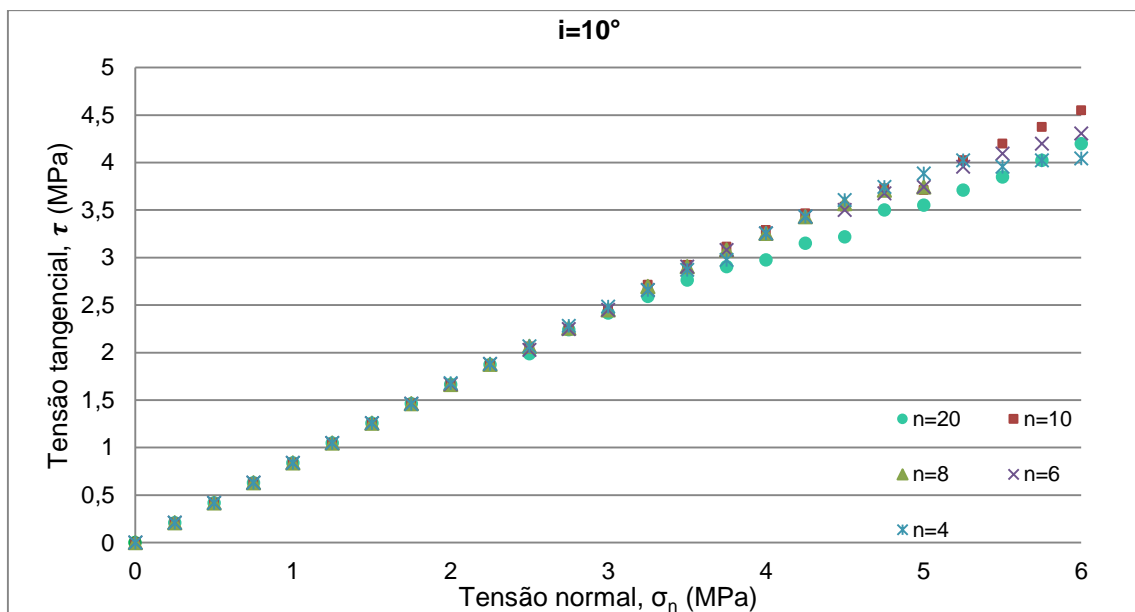


Figura 5.6 - Gráfico Tensão tangencial  $\tau$ -Tensão normal  $\sigma_n$  obtidos na modelação para os diferentes números de saliências com  $i=10^\circ$ .



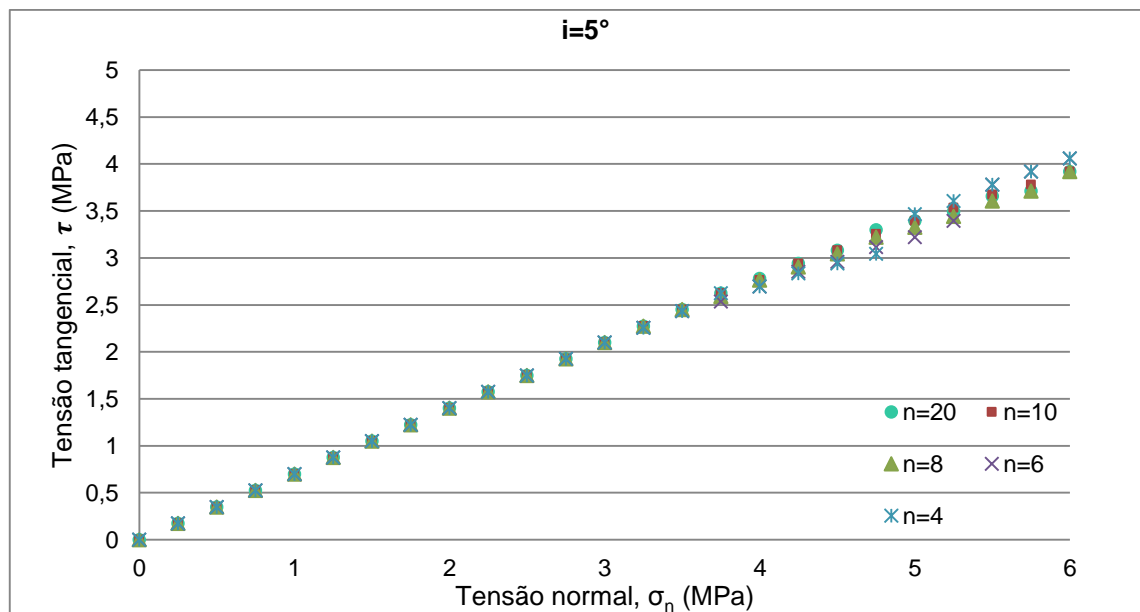


Figura 5.7 - Gráfico Tensão tangencial  $\tau$ -Tensão normal  $\sigma_n$  obtidos na modelação para os diferentes números de saliências com  $i=5^\circ$ .

Analisando os gráficos obtidos, observa-se que até se atingir um determinado valor de tensão normal, a resistência tangencial não depende do número de saliências consideradas, mas sim da sua inclinação, ou seja, a envolvente de rotura é igual para todas as descontinuidades que apresentem a mesma inclinação.

É possível então determinar para cada inclinação, o valor de tensão normal a partir do qual os valores de tensão tangencial passam a ser dependentes do número de saliências consideradas. Esta variação poderá estar relacionada com a amplitude das descontinuidades.

No quadro 5.1 apresentam-se, para cada inclinação, os valores de tensão normal e tensão tangencial para o qual se verifica a alteração da tendência da envolvente de rotura.

Tabela 5.1 - Valores de tensão normal e tangencial correspondentes ao ponto A da figura 5.3 para cada uma das inclinações consideradas.

Inclinação, $i$ (graus)	Tensão normal, $\sigma_n$ (MPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (MPa)
20	1	1.19
15	1.5	1.5
10	2.5	2.1
5	3.25	2.28

Estes valores são muito importantes para esta análise porque definem a mudança de comportamento deformacional das juntas. Assim, os pontos apresentados no quadro referem-se aos pontos para o qual passa a ocorrer o fenómeno do corte das asperezas presentes na superfície das juntas, seguido de dilatação.

Importa referir que, para menores inclinações das asperezas ( $i$ ), a tensão normal para o qual ocorre alteração da tendência da envolvente de rotura apresenta maiores valores. Ou seja, para descontinuidades com menor inclinação, é necessário uma maior tensão normal para que se registre o fenómeno do corte das saliências, como se pode constatar no gráfico da Figura 5.8. Esta premissa é coerente com os ensaios efetuados por Khosravi *et al.* (2013), onde, para os mesmos valores de tensão normal, as descontinuidades com maiores inclinações apresentaram o corte das saliências e as descontinuidades com menores inclinações sofreram apenas dilatação.

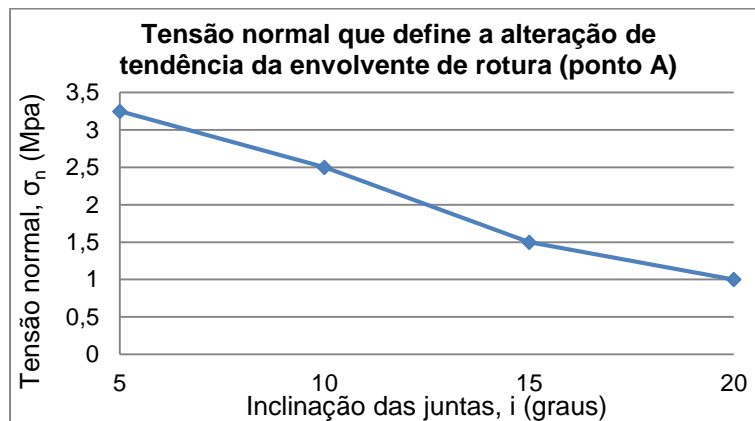


Figura 5.8 - Valores de tensão normal obtidos na modelação que separam a ocorrência de dilatação e corte em função dos valores de inclinação.

Com os valores apresentados no quadro, é possível definir as envolventes teóricas de rotura. Sendo que a partir dos pontos apresentados, as expressões que definem o comportamento resistente da descontinuidade passam a ser definidas por uma inclinação que apenas depende do ângulo de atrito.

Por forma a comparar-se os valores das envolventes de rotura obtidas com recurso à modelação numérica e as equações teóricas das retas acima descritas optou-se por se representar graficamente as envolventes para vinte saliências. A descontinuidade com 20 saliências será a mais próxima da envolvente que define a segunda reta do critério bilinear uma vez que apresenta menor amplitude e consequentemente será a que tem uma geometria mais próxima da descontinuidade lisa.

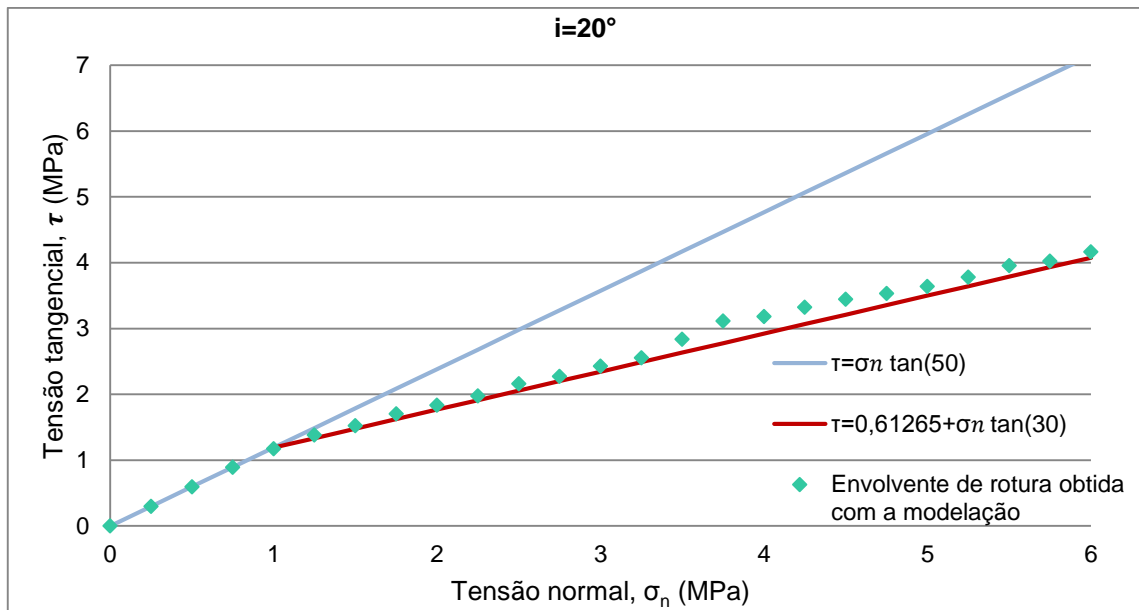


Figura 5. 9 - Comparação entre as envolturas de rotura teórica e a obtida na modelação para  $i=20^\circ$ ;  $n=20$ .

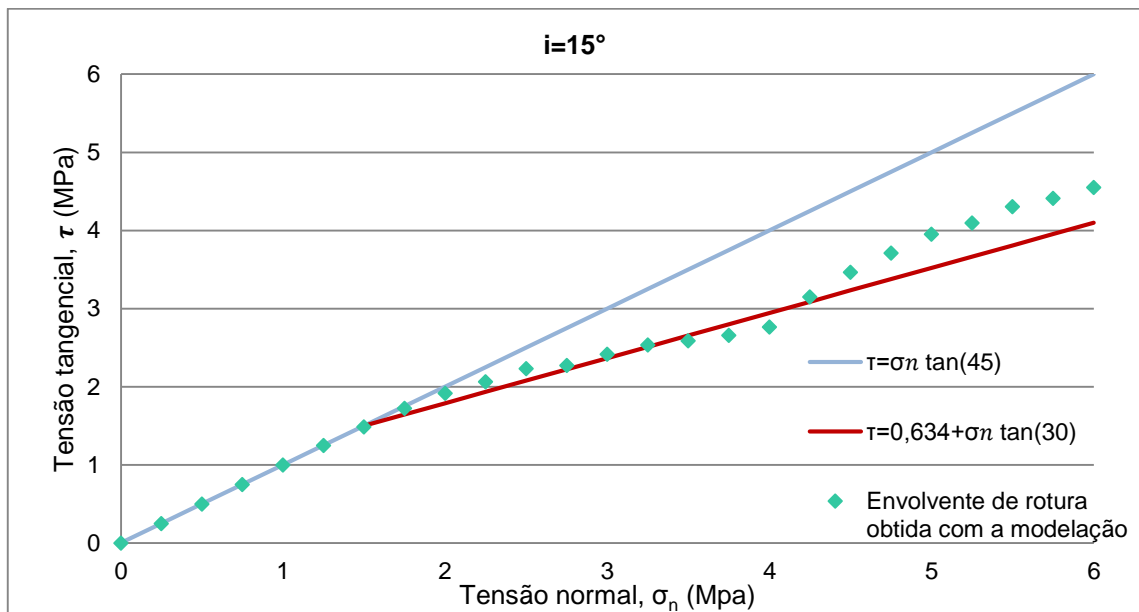


Figura 5.10 - Comparação entre as envolturas de rotura teórica e a obtida na modelação para  $i=20^\circ$ ;  $n=15$ .

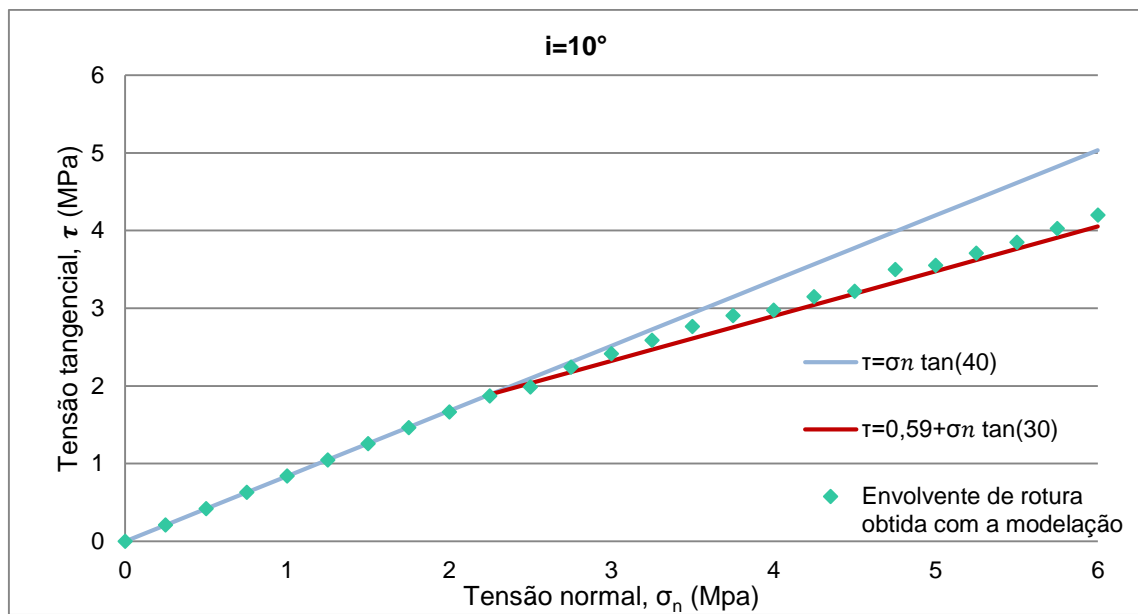


Figura 5.11 - Comparação entre as envolturas de rotura teórica e a obtida na modelação para  $i=20^\circ$ ;  $n=10$ .

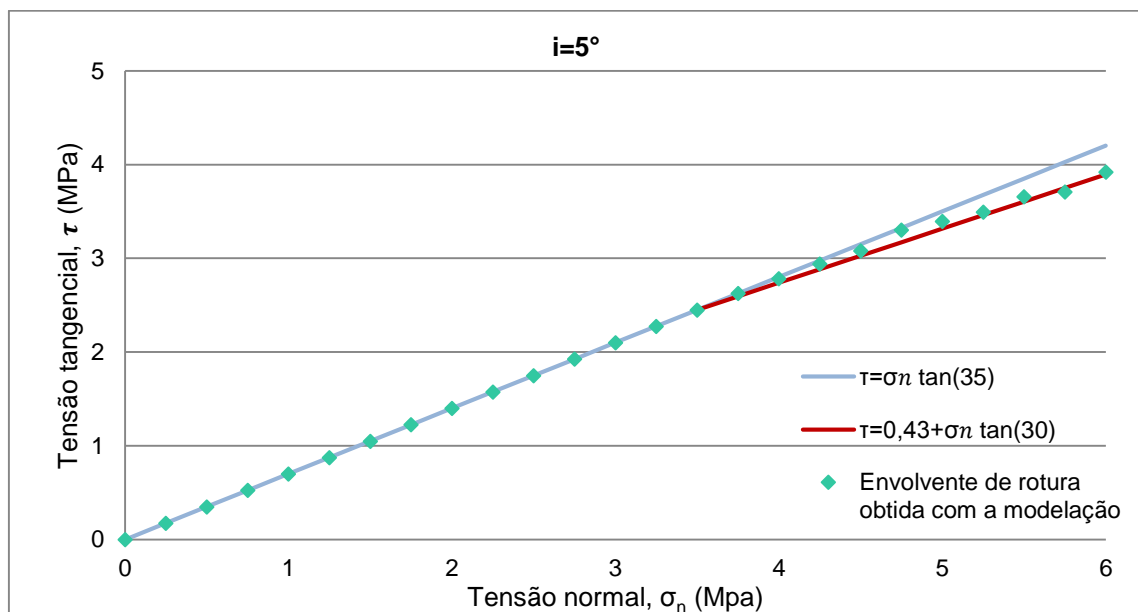


Figura 5.12 - Comparação entre as envolturas de rotura teórica e a obtida na modelação para  $i=20^\circ$ ;  $n=5$ .

Observando os gráficos acima apresentados compreende-se que as equações teóricas de resistência tangencial definem aproximadamente o comportamento das descontinuidades. No entanto, o comportamento resistente obtido para tensões normais superiores aos valores apresentados na tabela 5.1 é ligeiramente diferente. Isto acontece porque quando ocorre o corte das descontinuidades, o comportamento não corresponde totalmente ao comportamento da descontinuidade lisa, pelo facto de não ocorrer a rotura total das saliências, apresentando estas alguma rugosidade.

Como para tensões mais baixas a rotura só depende da inclinação das descontinuidades, pode concluir-se que na rotura por ocorrência de dilatância os valores de tensão tangencial de pico são iguais para as descontinuidades com o mesmo valor de inclinação das saliências, não sendo influenciados pela variação da amplitude na descontinuidade.

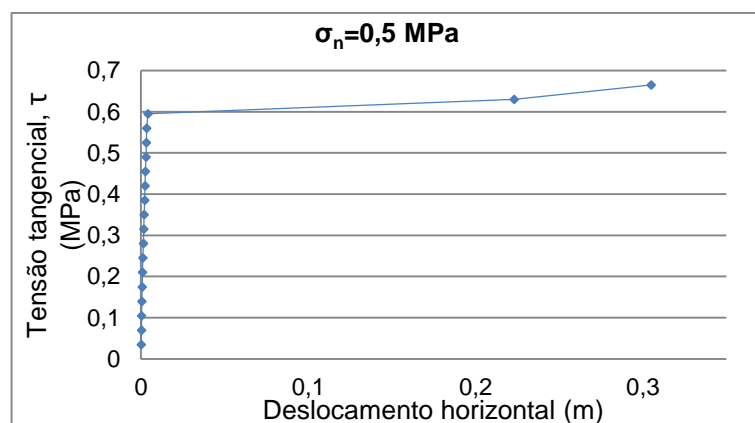
O mesmo não acontece para valores de tensão normal superiores aos presentes na tabela 5.1. Para estas situações, onde ocorre rotura por corte, o comportamento varia consoante o número de saliências de cada descontinuidade. Para as juntas em que se consideraram saliências com maiores inclinações é notável que quanto menor for o número de saliências da descontinuidade, maior é a tensão de corte para se atingir a rotura sob a aplicação do mesmo carregamento normal. Isto significa que quanto maior for a amplitude das descontinuidades maior será o valor de tensão tangencial de pico. Ao contrário, para valores de menor amplitude, maior número de asperezas, as tensões de pico são mais baixas, encontrando-se a curva mais próxima da envolvente de rotura.

De notar que, para valores de inclinação mais baixos, a premissa anteriormente mencionada não é tão visível pelo facto de haver uma menor variação no valor das amplitudes em função do número de saliências apresentando-se uma maior dispersão nos resultados.

### 5.3.2 CASO DE OCORRÊNCIA DE DILATÂNCIA ( $\sigma_n=0.5$ MPa)

Para se analisar de forma mais precisa a ocorrência de dilatância, simulou-se um ensaio de resistência ao corte com recurso ao *software*. Como foi apresentado anteriormente, para que ocorra dilatância é necessário que o ensaio se processe sob baixo valor de tensão normal. Com esta condição e com o incremento da tensão de corte irá ocorrer deslocamento de uma das metades do bloco resultante do galgamento das asperezas.

Para se observar este fenómeno utilizou-se a junta com seis saliências, com uma inclinação de 20 graus. A simulação do ensaio realizou-se sob uma tensão normal constante de 0.5 MPa e, recorrendo à criação de estágios, aplicou-se uma carga distribuída no bloco inferior entre 0 e 1.9 MPa com incrementos de 0.1 MPa. O gráfico apresentado na Figura 5.13 relaciona a tensão de corte (carga aplicada dividida pela área da descontinuidade) e os deslocamentos horizontais registados no bloco inferior da amostra. Por sua vez, a Figura 5.14 apresenta os deslocamentos verticais registados no bloco superior.



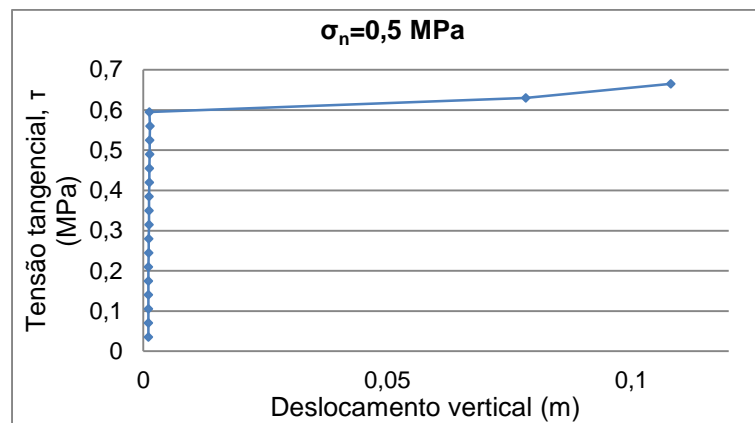


Figura 5.14 - Gráfico tensão tangencial-deslocamento vertical para  $\sigma_n=0.5$  MPa.

Como se pode observar, para uma tensão tangencial de aproximadamente 0,6 MPa verifica-se a rotura do bloco. Tanto os valores de deslocamento horizontal da parte inferior do provete como os deslocamentos verticais na parte superior disparam quando se atinge este valor de tensão. Este valor é coerente com o valor que define a envolvente de rotura calculada para esta descontinuidade.

Com o *software* é possível obter a evolução da cedência dos elementos. Como se pode observar pela Figura 5.15, a cedência ocorre inicialmente nas zonas que se encontram impedidas de se deslocar ou junto às chapas metálicas. Com o incremento da carga horizontal ocorre o alastramento destas zonas, acompanhado pelo surgimento de zonas de cedência nos vértices das descontinuidades. A Figura apresentada não representa todos os estágios realizados, pelo que se optou por apresentar as zonas de cedência obtidas com um intervalo de 0,2 MPa de carga distribuída horizontal.

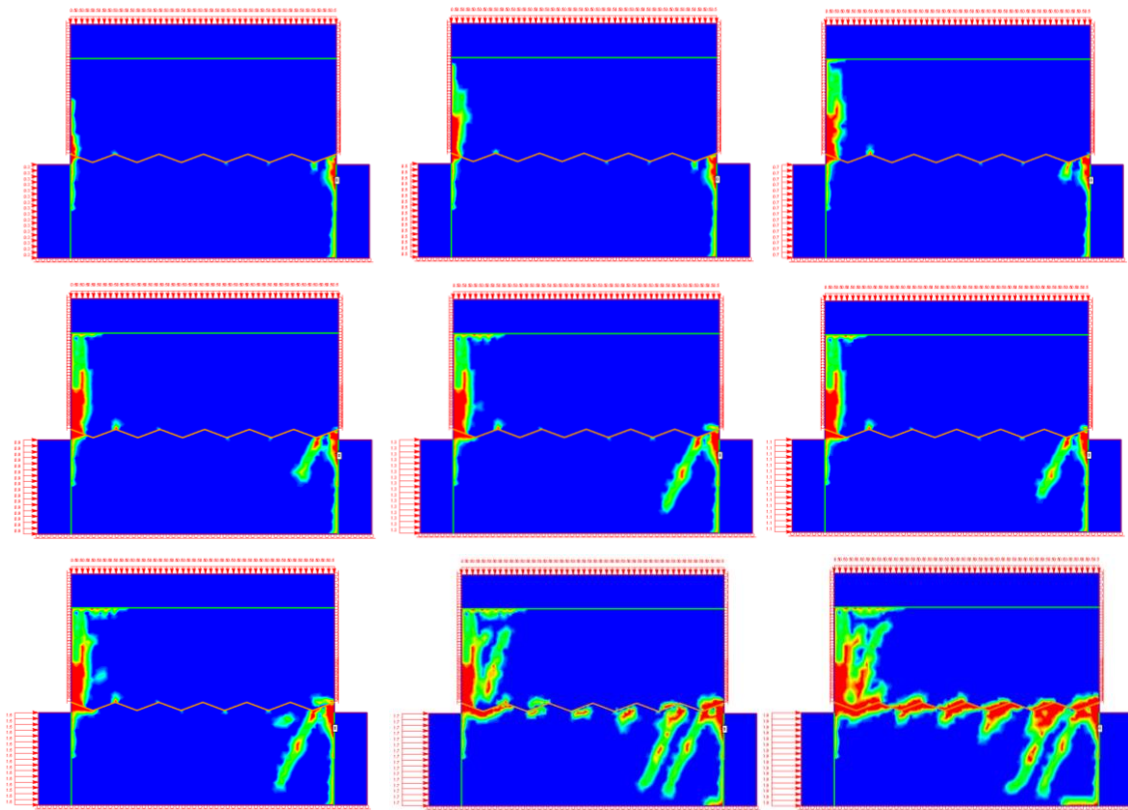


Figura 5.15 – Evolução dos elementos de cedência para uma tensão normal de 0.5 MPa e carga distribuída horizontal de 0.1 a 1.9 MPa com intervalos de 0.2 MPa.

De forma a comprovar-se a ocorrência de dilatância, recorreu-se à apresentação dos resultados obtidos para o estágio com carregamento horizontal de 1.8 MPa (Figura 5.16), que corresponde a uma tensão tangencial aplicada na descontinuidade de 0.63 MPa. Este estágio representa a fase que sucede a rotura do elemento, sendo possível verificar-se a ocorrência de dilatância.

A ocorrência deste fenómeno para as condições do modelo imposto verifica-se quando o bloco superior do provete se desloca verticalmente no sentido ascendente e quando o bloco inferior se desloca para a direita sem danificar as saliências da superfície da descontinuidade.

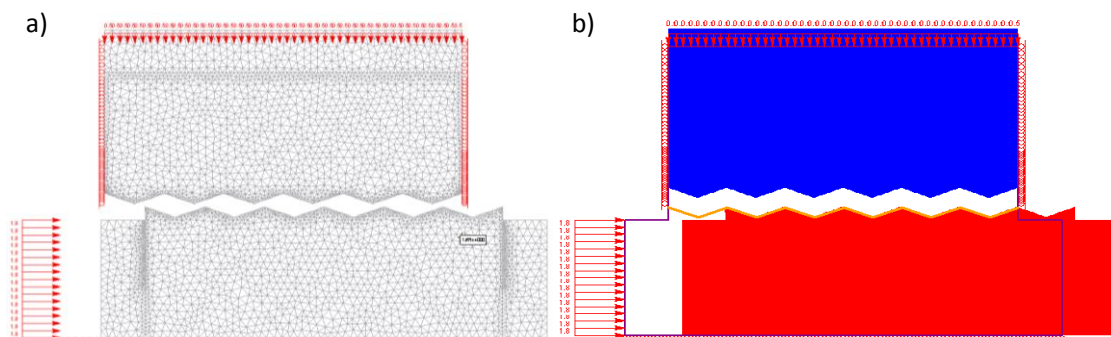


Figura 5.16 - Representação da ocorrência de dilatância para  $T=1.8$  MPa; a) Malha de elementos finitos; b) Deslocamentos horizontais.

Ao longo dos diferentes estágios a que o modelo foi submetido, verificou-se que não houve qualquer tipo de alteração da malha, ficando assim comprovado que para este valor de tensão normal não ocorre o corte das saliências, permanecendo estas intactas depois de se atingir a tensão de corte de pico.

### 5.3.3 CASO DE OCORRÊNCIA DE CORTE E DILATÂNCIA ( $\sigma_n=2$ MPa)

Para se verificar a ocorrência do corte das saliências presentes na superfície da descontinuidade repetiu-se o processo efetuado em 5.3.2 para uma tensão normal constante superior. Para a realização da modelação deste ensaio considerou-se uma tensão normal de 2 MPa e incrementou-se o carregamento horizontal. Importa referir que, como se trata de uma tensão normal muito superior a rotura acontece para valores de tensão tangencial superiores pelo que os incrementos de tensão considerados não são iguais, tendo-se efetuado menores incrementos para valores próximos da rotura.

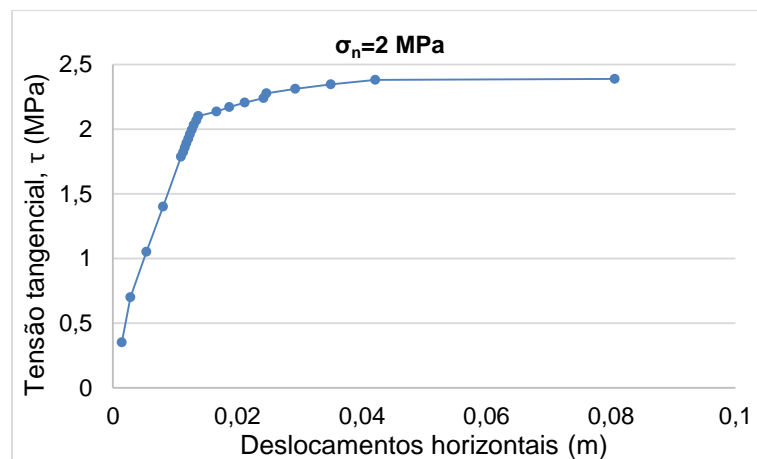


Figura 5.17 - Gráfico tensão tangencial-deslocamento horizontal para  $\sigma_n=2$  MPa.

Com o gráfico tensão tangencial-deslocamentos horizontais (Figura 5.17), podemos destacar um comportamento faseado ao contrário do que acontece para tensões mais baixas. Numa fase inicial, o aumento da tensão tangencial provoca deslocamentos baixos, até que atinge um ponto em que os deslocamentos aumentam em diferente escala, este ponto ocorre para uma carga distribuída aplicada de 6 MPa ( $\tau=2.1$  MPa). Como se pode observar na Figura 5.18, este valor de tensão tangencial corresponde ao ponto em que todas as áreas envolvidas da descontinuidade cederam.



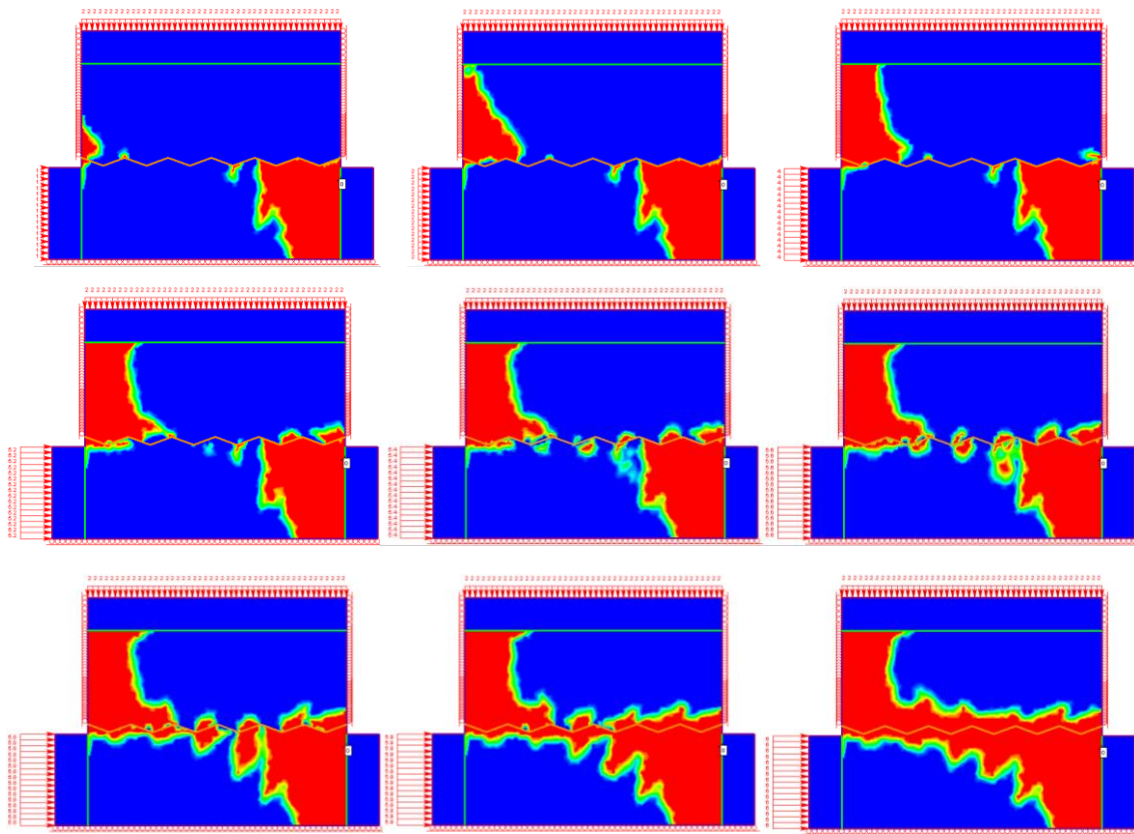


Figura 5.18. - Evolução dos elementos de cedência ao longo do ensaio para uma tensão normal de 2 Mpa e uma carga distribuída horizontal de 1, 2, 4, 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.9, 6 MPa

Para este valor de carga, a cedência do material origina deslocamentos horizontais do bloco inferior do modelo acompanhado por um progressivo aumento do corte das saliências. O corte das saliências ocorre até ao valor de carregamento horizontal de 6.8 MPa, que corresponde a uma tensão tangencial aplicada na descontinuidade de 2.38 MPa. A partir deste valor de tensão, os deslocamentos horizontais disparam para valores muito superiores aos verificados. Esta mudança de comportamento ao nível dos deslocamentos é justificada pela ocorrência de dilatação.

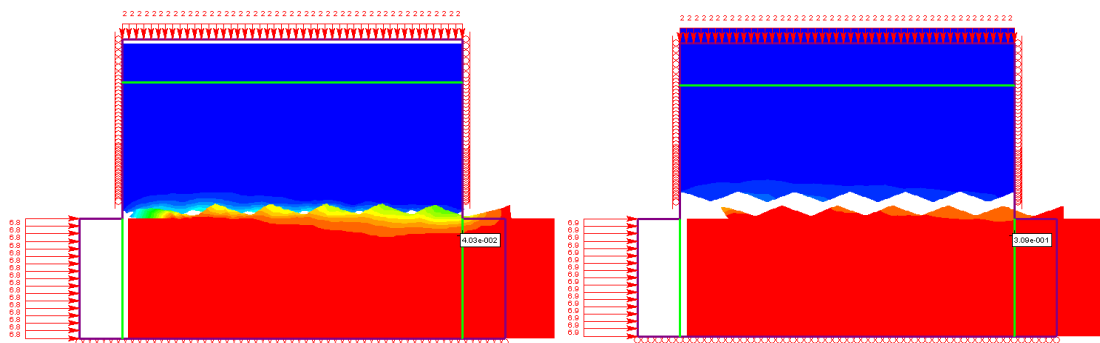


Figura 5.19 – Deslocamentos horizontais para um carregamento horizontal de 6.8 MPa e 6.9 MPa

Através da observação dos deslocamentos horizontais apresentados para um carregamento horizontal de 6.8MPa confirma-se a ocorrência de corte das saliências presentes na superfície da descontinuidade pelo

facto de apresentar diferentes valores de deslocamento horizontal ao longo do modelo. Assim, observa-se que junto aos vértices da descontinuidade no bloco inferior os deslocamentos são menores, o que significa que não acompanham os deslocamentos registados no restante bloco.

Depois de se verificar o corte das asperezas, com o incremento da tensão horizontal sucede o fenómeno de dilatação e a partir do qual os deslocamentos são muito elevados resultantes da separação total dos blocos pela descontinuidade.

#### 5.3.4 CÁLCULO DE SRF PARA $\sigma_n=0.1$ MPa E $\tau=0.105$ MPa

Como foi visto anteriormente, as descontinuidades com saliências podem ser obtidas recorrendo à introdução das coordenadas geométricas dos vértices ou pela criação de famílias de descontinuidades. Para se poder obter uma comparação entre elas e uma verificação da congruência destas com os valores teóricos procedeu-se ao cálculo do fator de redução de tensões (*Strength Reduction Factor*, SRF)

Os valores de carregamento para o qual foram efetuados os cálculos automáticos e analíticos de fator de redução de tensões são iguais em todas as situações de estudo e assumem os valores carregamento normal e tangencial de 0.1 MPa e 0.3 MPa, respetivamente. De referir que neste estudo não foram analisadas as descontinuidades com 20 saliências.

Como este cálculo foi realizado para um valor de tensão normal reduzido ( $\sigma_n=0.1$  MPa), a envolvente de rotura que define o comportamento para as diferentes inclinações vêm dado pela equação de Patton que define a primeira reta do critério bi-linear, sendo a tensão tangencial dependente do ângulo de atrito e da inclinação das asperezas.

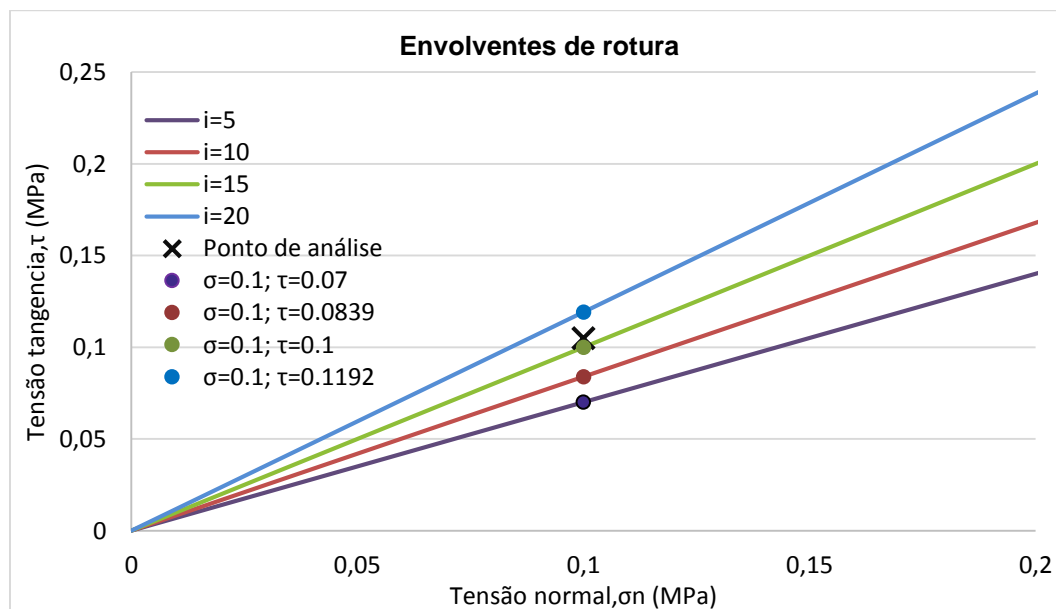


Figura 5.20 - Representação do ponto de análise para o cálculo de fator de segurança.

A Figura 5.20 representa as envolturas teóricas para as diferentes inclinações das juntas. O ponto de análise corresponde ao carregamento a que os modelos das juntas foram submetidos (tensão normal e tangencial iguais a 0.1 e 0.105 MPa, respetivamente). Como se pode observar diretamente pelo gráfico,

o ponto correspondente ao carregamento do ensaio encontra-se entre as envolventes de rotura das descontinuidades com inclinação igual a 20° e 15°. Isto significa que apenas a descontinuidade com 20° apresentará um fator de segurança superior à unidade, porque para se atingir a situação limite é necessário um aumento da tensão tangencial aplicada na descontinuidade. Ao contrário, para as restantes inclinações, o fator de segurança apresentará um valor inferior à unidade, pelo que estas condições de carregamento encontram-se fora das envolventes de rotura das respetivas descontinuidades.

Numa primeira fase efetuou-se o cálculo analítico do fator para a situação de carregamento mencionada de forma a obter-se um valor de comparação entre as descontinuidades. De notar que a carga distribuída horizontal introduzida no *software* não corresponde à tensão tangencial aplicada na descontinuidade pelo que esta tem de ser calculada. De seguida apresentam-se as equações utilizadas no cálculo analítico do fator segurança e os respetivos resultados para cada inclinação.

$$\tau_{actante} = \frac{T \times L}{A} = \frac{0.3 \times 0.07}{0.2} = 0.105 \text{ MPa} \quad (5.1)$$

$$\tau_{resistente} (Patton) = \sigma_n \times \tan(\phi + i) = 0.1 \times \tan(30 + i) \quad (5.2)$$

$$FS = \frac{\tau_{resistente}}{\tau_{actante}} \quad (5.3)$$

Tabela 5.2 - Fatores de segurança obtidos analiticamente.

Inclinação, i (graus)	$\tau$ resistente (KPa)	$\tau$ actante (KPa)	Fator de segurança
5	70.0	105	0.55
10	83.9	105	0.667
15	100	105	0.952
20	119.2	105	1.135

Relativamente aos resultados obtidos com a modelação das descontinuidades, obteve-se resultados de SRF (*Strength Reduction Factor*) iguais quer para as juntas obtidas por introdução de coordenadas geométricas, quer para as juntas que resultam da interseção de duas famílias de descontinuidades. Este facto permite concluir que o material onde estão inseridas as famílias de descontinuidades foi criado com os parâmetros de Mohr-Coulomb correspondentes aos de Hoek Brown e que a interseção entre as famílias de descontinuidades define corretamente a geometria da junta similar.

Como seria de esperar, os resultados obtidos com a modelação demonstram que quanto maior o valor da inclinação considerada nas saliências presentes na superfície da descontinuidade, maior o valor de SRF obtido, e que não existe variação do fator de segurança associado a uma alteração do número de saliências. Este resultado é coerente com as envolventes de rotura obtidas em 5.3.1. Como o valor da

tensão normal aplicada é muito reduzido ( $\sigma_n=0.1$  MPa), num gráfico tensão normal-tensão tangencial a envolvente de rotura não depende do número de saliências.

Procurando analisar o efeito da posição horizontal das descontinuidades, procedeu-se à comparação dos resultados de SRF entre as juntas apresentadas no quadro 4.3 e as respectivas descontinuidades com translação de  $\Delta l/2$  (juntas simétricas). A comparação entre elas apresenta-se no gráfico da Figura 5.21.

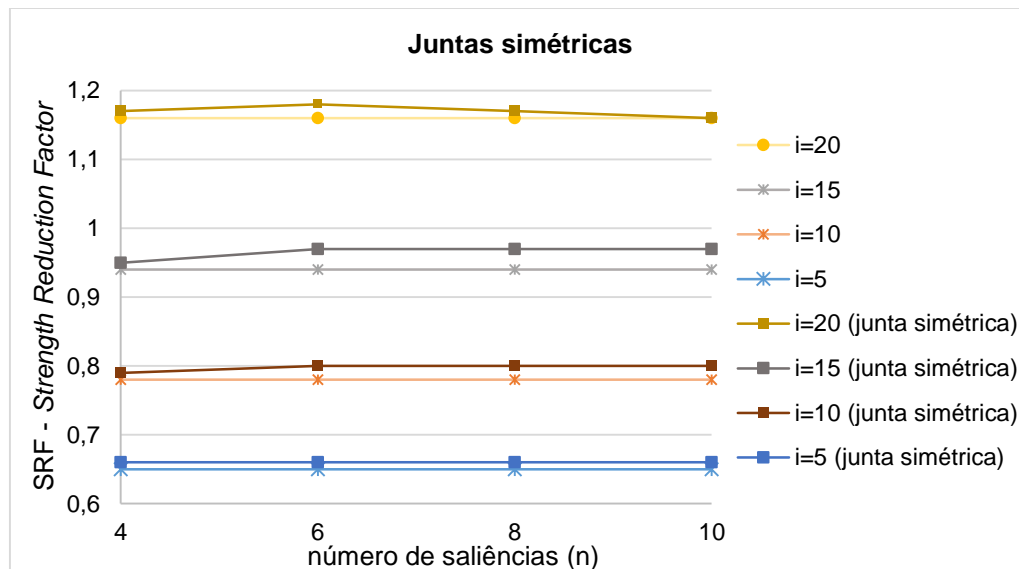


Figura 5.21 - Gráfico comparativo de valores de SRF para as juntas normais e simétricas.

Analisando os resultados obtidos compreende-se que as descontinuidades simétricas apresentam valores de SRF muito semelhantes aos das descontinuidades normais. A diferença pouco significativa dos valores de SRF poderá dever-se ao facto da malha ser graduada, apresentando diferentes valores de número de elementos em função das geometrias consideradas. No entanto, pelo facto da diferença de valores ser pouco expressiva pode concluir-se que a consideração da posição horizontal da junta não apresenta um efeito relevante na sua resistência ao corte e deslizamento, sendo este valor maioritariamente dependente da inclinação das saliências.

Para se verificar a congruência dos resultados conseguidos através da modelação com os valores de fator de segurança calculados analiticamente de acordo com o critério de Patton, efetuou-se a representação gráfica apresentada na Figura 5.22. Como os valores para a descontinuidade simétrica apresentam uma ligeira variação de SRF com a consideração de diferentes números de saliências, os valores apresentados no gráfico para esta situação resultam da média entre eles para cada uma das inclinações.

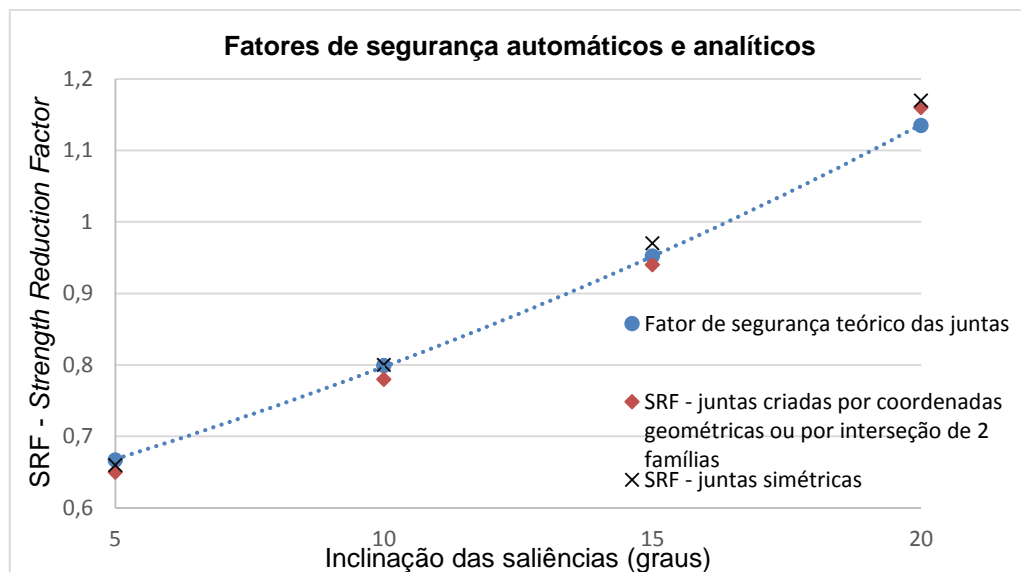


Figura 5.22 - Gráfico comparativo dos valores de SRF para as diferentes situações.

Por observação do gráfico apresentado pode concluir-se que os valores obtidos com recurso à modelação são muito semelhantes aos valores teóricos obtidos de acordo com a equação de Patton para todas as situações modeladas. De referir que, à medida que a inclinação aumenta, existe uma maior diferença entre os valores de fator de redução de tensões, no entanto a diferença não é significativa.

#### 5.4 JUNTAS COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO OBLÍQUA AO PLANO DE CORTE

Os cálculos efetuados com as descontinuidades criadas pela interseção de duas famílias de descontinuidades e a sua posterior comparação com as descontinuidades definidas por coordenadas geométricas e com os valores teóricos de fator de segurança permitiram concluir que as juntas podem ser definidas pela caracterização da orientação e do espaçamento de duas famílias de descontinuidades.

Esta consideração permite, através da definição da orientação de famílias de descontinuidades, criar juntas que apresentem rugosidades com orientação num plano oblíquo relativamente ao plano de corte. Assim, com o auxílio do *software* foi possível obter-se resultados relativamente à influência da orientação das saliências presentes numa junta na avaliação da sua resistência ao corte e deslizamento.

Para se realizar esta análise considerou-se como base as descontinuidades com seis saliências na direção perpendicular ao plano de corte. Posto isto, definiram-se os valores da orientação (*dip* e *dip direction*) e do espaçamento apresentados na tabela 4.5.

A aplicação de um ângulo de orientação das saliências através da alteração dos valores da direção de mergulho e do espaçamento, implica alguns aspetos relativos à geometria da descontinuidade que são visíveis logo após a introdução destes parâmetros no *software*:

- Alteração da inclinação da descontinuidade na vista perpendicular ao plano de corte (ângulo de inclinação aparente ( $\alpha$ ));
- Alteração do número de saliências da junta, na vista perpendicular ao plano de corte.

Estes aspetos encontram-se representados na Figura 5.23, onde se apresenta a descontinuidade com inclinação igual a 20 graus e seis saliências orientadas perpendicularmente ao plano de corte (Figura

5.23a) e a mesma descontinuidade com um ângulo de orientação das rugosidades de  $50^\circ$  (Figura 5.23b). Como se pode observar, associado a um aumento do ângulo  $\theta$  está não só uma alteração na inclinação das saliências, mas também um aumento da sua largura aparente verificada por uma redução do número de saliências.

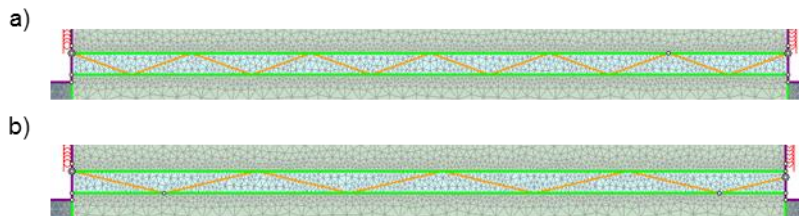


Figura 5.23 - a) Junta com  $\theta=0^\circ$ ; b) Junta com  $\theta=50^\circ$

Relativamente ao primeiro aspeto, que apresenta maior relevância, importa referir que, a alteração da inclinação aparente ( $\alpha$ ) é tanto maior quanto maior for o ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ), sendo que quanto maior for o valor do ângulo  $\theta$ , menor será o valor do ângulo de inclinação aparente, tal como se apresenta no gráfico da Figura 5.24.

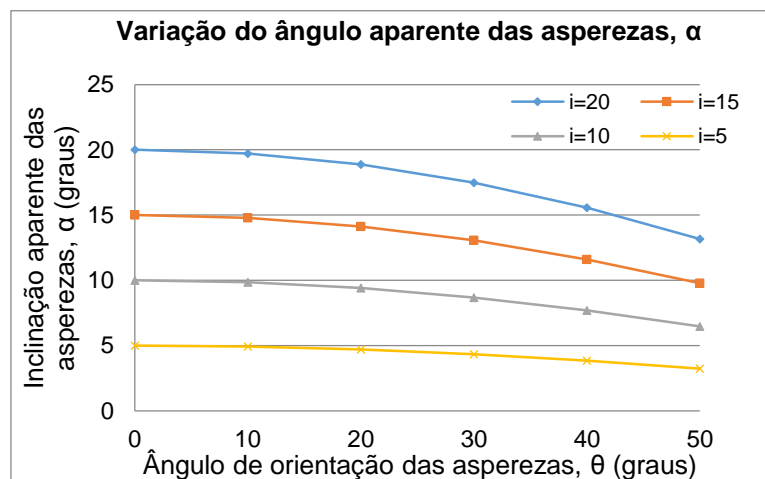


Figura 5.24 - Gráfico representativo da variação da inclinação aparente das asperezas ( $\alpha$ ) em função do aumento do ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ).

#### 5.4.1 CÁLCULO DE SRF PARA DIFERENTES VALORES DE INCLINAÇÃO DAS ASPEREZAS, $\theta$

Para se verificar a variação da resistência ao corte e deslizamento efetuou-se o cálculo do valor de SRF para uma tensão normal de 0.1 MPa e um carregamento horizontal de 0.3 MPa. A Figura 5.25 representa graficamente a variação do valor de SRF para cada uma das inclinações das saliências consideradas em função do ângulo de orientação das saliências. Como se pode observar, o aumento do ângulo de orientação das saliências traduz-se numa redução do valor de SRF.

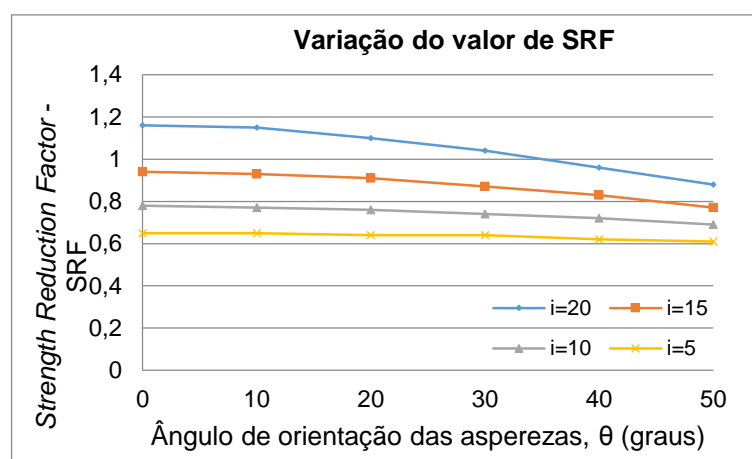


Figura 5.25 - Variação do SRF em função do ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ).

Importa referir que, o decréscimo do valor de SRF com o aumento da inclinação das asperezas é em tudo semelhante ao que acontece com a variação do ângulo de inclinação aparente. Observa-se ainda que surge uma redução mais acentuada do valor de SRF para as juntas com maiores valores de inclinação das saliências, porque para estes valores o aumento do ângulo de orientação das saliências tem maior efeito na redução do ângulo de inclinação aparente. Como o valor de SRF é um fator que relacionado com o valor das tensões de corte que devem ser aplicadas para que se atinja a situação limite, podemos concluir que o progressivo aumento do ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ) traduz-se numa redução do ângulo de inclinação aparente ( $\alpha$ ), que por sua vez contribui para uma redução da resistência tangencial das descontinuidades.

Outro fator que importa ter em conta é o facto do aumento do ângulo de orientação das asperezas ( $\theta$ ) ter um efeito de alteração das tensões que nela se encontram aplicadas, deixando estas de estar aplicadas de forma perpendicular à orientação das asperezas.

#### 5.4.2 SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE PARA $\sigma_n=0.5$ MPa E $\sigma_n=2$ MPa

Para se verificar o efeito da orientação das asperezas presentes na superfície da descontinuidade no comportamento mecânico dos modelos, simularam-se ensaios de resistência ao corte para dois níveis de tensão normal constantes, 0,5 MPa e 2 MPa. Com estes ensaios foi possível observar o comportamento de deformação para diferentes estágios de carregamento horizontal. A descontinuidade utilizada nestes ensaios foi a descontinuidade com 6 saliências de inclinação igual a 20 graus.

No ensaio sob tensão normal constante de 0,5 MPa, efetuaram-se estágios com carregamento horizontal entre 0,1 e 1,9 MPa com intervalos de 0,1 MPa. Nestas condições obteve-se os deslocamentos horizontais na parte inferior do provete, apresentados na Figura 5.26.

Como se pode observar pelo gráfico tensão tangencial-deslocamentos horizontais (Figura 5.26), a resistência tangencial de pico varia em função da orientação das asperezas, na medida em que um aumento do ângulo de orientação das asperezas implica uma redução da tensão tangencial de pico.

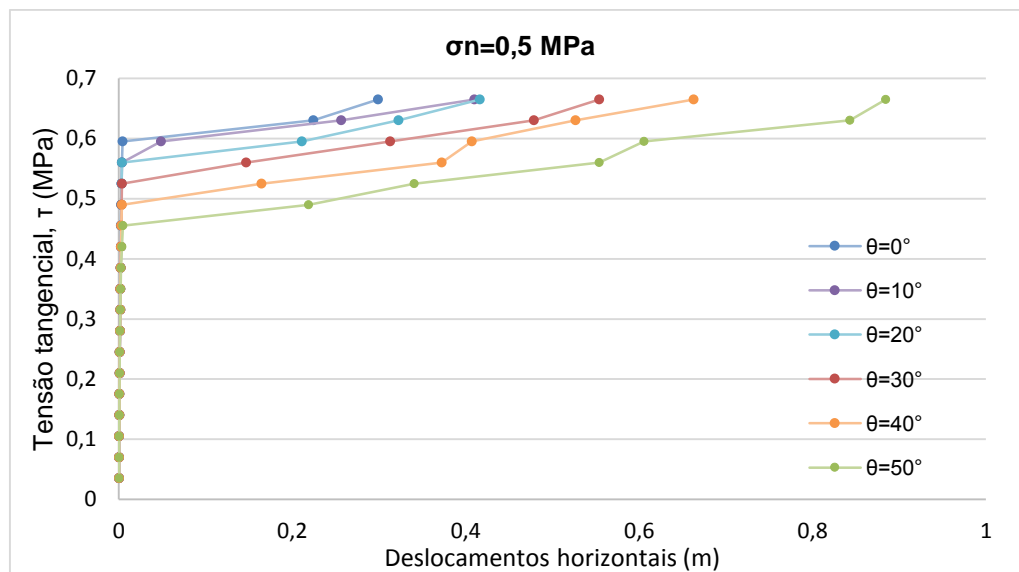


Figura 5.26 - Gráfico tensão tangencial-deslocamentos horizontais para diferentes orientações das asperezas sob tensão normal constante igual a 0.5 MPa.

Como é normal neste tipo de ensaios, depois de se atingir a tensão de pico para cada uma das situações apresentadas, os deslocamentos horizontais aumentam em grande escala. Como a resistência tangencial de pico apresenta menores valores para as descontinuidades com maior ângulo de inclinação das asperezas, é normal que quando estas são solicitadas com o carregamento horizontal de 1.9 MPa apresentem maiores valores de deslocamentos horizontais. Para este nível de tensão normal, como seria de esperar, as saliências permaneceram intactas, verificando-se a ocorrência apenas de dilatância.

Relativamente à simulação do ensaio realizado para uma tensão normal constante de 2 MPa, efetuaram-se estágios com carregamento horizontal entre 0.5 e 6.75 MPa, com incrementos de 0.25 MPa, tendo-se obtido os deslocamentos apresentados na Figura 5.27.



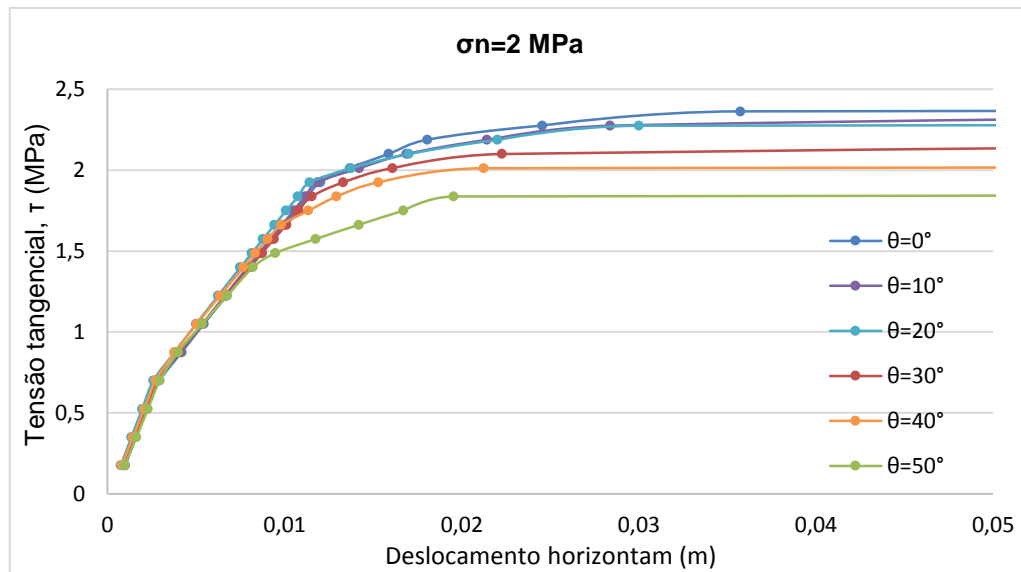


Figura 5.27 - Gráfico tensão tangencial-deslocamentos horizontais para diferentes orientações das asperezas sob tensão normal constante igual a 2MPa.

Tal como acontece para menores valores de tensão normal, o comportamento resistente da descontinuidade é afetado pela orientação das asperezas presentes na descontinuidade.

Nestas condições, todas as descontinuidades apresentaram o corte das asperezas quando se aplicaram maiores valores de carregamento horizontal. No entanto, o corte das asperezas não se verificou igual para todas elas. Assim, de forma a efetuar-se uma comparação entre a magnitude do corte em cada uma das situações analisadas, foram observados com maior atenção os esquemas de deslocamentos horizontais para os estágios correspondentes às tensões máximas de pico.

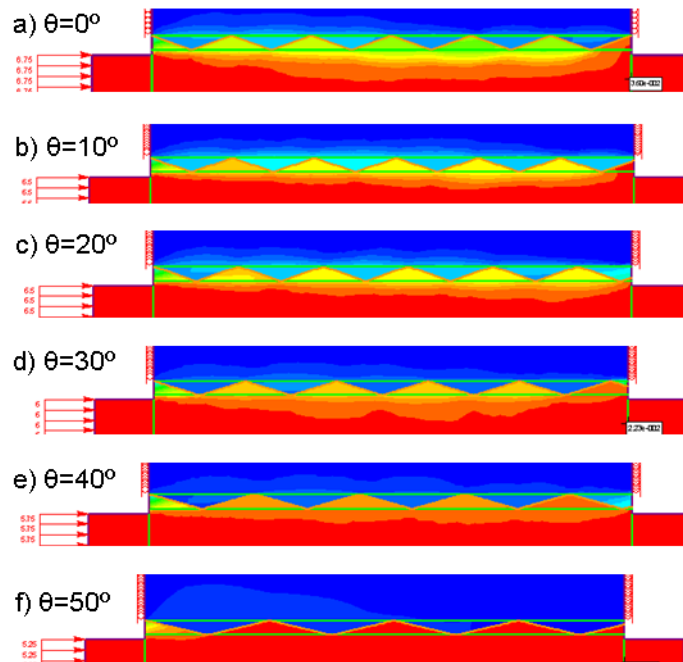


Figura 5.28 - Esquema representativo dos deslocamentos horizontais nas proximidades da descontinuidade para os diferentes ângulos de orientação das asperezas,  $\theta$ .

Como se pode verificar através da Figura 5.28, a magnitude do corte das asperezas é afetada pela orientação das mesmas. À medida que o ângulo de orientação das asperezas aumenta, verifica-se que menor área da superfície da descontinuidade é cortada, visto que os deslocamentos horizontais apresentam maior homogeneidade em ambos os blocos. O mesmo não acontece quando se consideram baixos valores de ângulos de inclinação das asperezas, onde os deslocamentos horizontais na superfície da descontinuidade não acompanham os movimentos do respetivo bloco.

O facto do corte das asperezas apresentar menor volume para as descontinuidades com maior ângulo de orientação das asperezas pode ser justificado pelos carregamentos horizontais serem aplicados de forma oblíqua relativamente ao desenvolvimento das saliências da descontinuidade. Outro fator de importante relevo é o facto de maiores ângulos de orientação das asperezas possibilitarem deslocamentos no plano do desenvolvimento das asperezas. Ou seja, para as saliências com ângulo de orientação igual a zero, o deslocamento processa-se na direção do carregamento, direção perpendicular ao plano da descontinuidade (Figura 5.29 a). Para as descontinuidades com saliências com orientação oblíqua relativamente ao plano de corte, o deslocamento na direção de desenvolvimento da descontinuidade fica possibilitado, sendo que quanto maior for o ângulo de orientação das asperezas, mais propício será a ocorrência do deslocamento nesta direção, como se encontra representado na Figura 5.29 b). Assim, compreende-se que, para esta situação o corte das saliências será inferior relativamente ao caso do deslocamento ocorrer no sentido do carregamento visto que, este deslocamento implica um alívio das tensões aplicadas às saliências da descontinuidade.

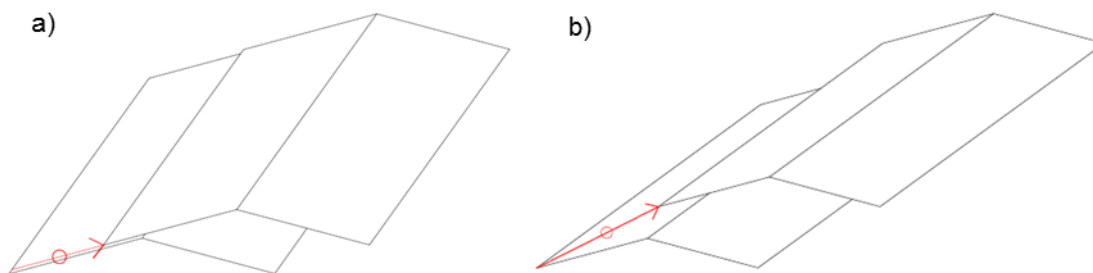


Figura 5.29 - Representação esquemática da direção de deslocamentos, a)  $\theta=0$ ; b)  $\theta \neq 0$ .

Com os cálculos automáticos efetuados, é possível compreender que o comportamento mecânico e deformacional de uma descontinuidade que apresenta rugosidade é afetado pela orientação das saliências presentes na sua superfície.

Os resultados obtidos com recurso à modelação são coerentes com os estudos efetuados por Khorsravi, Ali, *et al.*, visto que se verificou que o aumento do ângulo de orientação das asperezas implica uma redução da resistência ao corte e deslizamento, na medida em que o ângulo de inclinação aparente diminui e o carregamento é aplicado de forma oblíqua à sua orientação. Relativamente ao corte das asperezas, também estes autores confirmaram a existência de menor volume de corte para descontinuidades maior ângulo de orientação das asperezas.

# 6

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como já havia sido provado por diversos autores, a rugosidade é uma característica física que influencia em grande escala a resistência ao corte e deslizamento das juntas, e consequentemente, as características do maciço onde se insere. O facto de, na maior parte dos casos, as descontinuidades contribuírem para instabilidade global de maciços rochosos faz com que seja fundamental a sua descrição detalhada em termos morfológicos e físicos

Os processos de formação e posterior desenvolvimento na Natureza fazem com que seja inerente a presença de rugosidades nas descontinuidades. Este trabalho permitiu compreender em que medida alterações geométricas das descontinuidades afetam o comportamento resistente e deformacional do elemento onde estão inseridas.

Recorrendo ao Phase2 foi efetuada a modelação de um elemento com as dimensões da caixa de corte do equipamento presente na Faculdade de Engenharia. Assim, a modelação teve por base a geometria de um provete para ensaio de resistência ao corte e deslizamento. A meia altura do provete modelado foram testadas diversas descontinuidades com diferentes geometrias por forma a compreender a sua influência no comportamento mecânico e deformacional em pequena escala.

Ao longo deste trabalho foi provado através da análise computacional, que o aumento da inclinação das saliências presentes nas superfícies das descontinuidades contribui para um incremento da sua resistência ao corte e deslizamento, como é defendido por diversos autores, especialmente por Patton, que em 1966 introduziu no seu estudo este parâmetro, verificando a sua influência em provetes intersetados por descontinuidades com diferentes geometrias.

Com os resultados obtidos relativamente às juntas simétricas, foi possível compreender que o posicionamento horizontal das saliências presentes na superfície de uma descontinuidade não apresenta efeitos relativamente à resistência ao corte e deslizamento das juntas, sendo este parâmetro resistente, em termos geométricos, condicionado apenas pela inclinação das saliências.

Os resultados dos modelos desenvolvidos permitiram constatar que, numa análise tensão de corte-tensão normal, existe um ponto que separa a ocorrência de rotura por efeitos de dilatância e a rotura por corte das saliências seguido de dilatância. Verificou-se que este ponto, que define a mudança de inclinação da envolvente de rotura, varia em função da inclinação das saliências presentes na superfície das descontinuidades. Constatou-se que quanto maior for a inclinação das asperezas, maiores serão as tensões normais necessárias aplicar para que se verifique a ocorrência de corte das asperezas.

Ao longo do trabalho foram ainda efetuadas modelações considerando um ângulo de orientação das asperezas presentes na superfície da junta. Ou seja, considerou-se juntas com orientação das asperezas com um ângulo diferente de noventa graus relativamente ao plano de carregamento. Para se comprovar o efeito desta consideração na resistência ao corte e deslizamento foram criados quatro diferentes ângulos de orientação das asperezas e verificou-se que o aumento deste ângulo contribui para uma redução da resistência ao corte.

Concluiu-se que a variação do valor de resistência ao corte e deslizamento das descontinuidades orientadas de forma oblíqua relativamente ao plano de corte está diretamente ligada a uma variação do ângulo de inclinação aparente das descontinuidades, sendo que o aumento do ângulo de orientação das descontinuidades contribui para uma redução da inclinação aparente e consequentemente uma redução da resistência ao corte e deslizamento das juntas. Outro fator que também influencia a resistência das juntas está relacionado com o facto do ângulo de orientação das asperezas implicar alterações no carregamento aplicado. A consideração de orientação das asperezas implica que as cargas deixem de estar aplicadas de forma perpendicular ao desenvolvimento das saliências.

Ainda no que diz respeito à consideração da orientação das asperezas, concluiu-se que estas têm efeitos em termos de deformacionais, na medida em que quanto maior for o ângulo de orientação das asperezas menor serão as deformações das saliências pelo facto de ficar possibilitado o deslocamento na direção de desenvolvimento das asperezas.

De um modo geral, em condições diferentes das efetuadas laboratorialmente por outros autores, os resultados e conclusões retirados da modelação relativamente à influência da orientação das asperezas na sua resistência ao corte e deslizamento revelaram-se bastante coerentes. Assim, pode afirmar-se que as análises computacionais são uma ferramenta bastante válida para acompanhamento de ensaios de resistência ao corte e deslizamento.

A caracterização do comportamento mecânico e deformacional de um maciço rochoso é, na maior parte dos casos, obtida com recurso a ensaios *in situ* ou laboratoriais. Nesta vertente, a modelação numérica pode representar uma ferramenta muito útil para a previsão do comportamento das juntas nestes ensaios. Os ensaios físicos têm ainda associado a eles alguma incerteza na caracterização do comportamento das juntas, para além de elevados custos na sua aplicação, pelo que a sua execução com o acompanhamento paralelo da modelação numérica poderá ser uma mais-valia.

Importa referir que ainda existe um longo caminho a percorrer para que os ensaios modelados numericamente sejam uma base para os ensaios de resistência ao corte e deslizamento. No entanto, este será um caminho que poderá contribuir para um desenvolvimento mais rápido e mais vantajoso em termos económicos, com especial importância no ramo da geotecnia.

## 6.2 LIMITAÇÕES DA INVESTIGAÇÃO

Inicialmente ambicionava-se um estudo tridimensional do comportamento mecânico das descontinuidades com geometria definida recorrendo a um *software* de análise tridimensional, o RS3. Este *software* permite a criação de modelos semelhantes ao Phase2, mas onde é definido um desenvolvimento transversal ao plano criado em Phase2, considerando assim três dimensões nas suas análises. Neste sentido, foram efetuadas tentativas para a criação de juntas utilizando o *software* tridimensional que não se revelaram conclusivas porque o programa não contemplava esta valência.

Como o *software* foi atualizado pela Rocscience no decorrer da presente dissertação, e o software só ficaria disponível para os alunos da faculdade no início de Julho, procurou-se o adiamento da presente

dissertação para que fosse possível integrar o estudo das descontinuidades em 3 dimensões. No entanto as atualizações efetuadas pela *Rocscience* não foram vantajosas para o trabalho em questão.

A alternativa encontrada para solucionar este problema foi efetuar um breve estudo tridimensional com recurso ao Phase2 (software bidimensional) considerando a orientação das asperezas através da introdução do ângulo de mergulho e da sua direção, de modo a compreender-se a influência do desenvolvimento tridimensional das descontinuidades definidas geometricamente.

### 6.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No decorrer da investigação foram surgindo algumas temáticas que se consideraram ser pertinentes mas a sua concretização não foi possível quer por falta de tempo ou por limitações que surgiram neste período.

Como prioridade, sugere-se que seja efetuado um estudo realmente tridimensional, recorrendo a *software* adequado. Quando o *software* da *Rocscience* efetuar a modelação de descontinuidades através da introdução de coordenadas geométricas ou por definição de duas famílias de descontinuidades, o estudo da influência da rugosidade das descontinuidades na resistência ao corte das juntas será uma mais-valia para se acompanhar os ensaios de resistência ao corte e deslizamento efetuados *in situ* ou em laboratório. Na medida em que os valores resultantes da modelação deverão ser muito próximos dos ensaiados.

Nesta vertente propõe-se que seja efetuado um estudo laboratorial do comportamento mecânico de descontinuidades com geometria definida e características morfológicas conhecidas e posteriormente efetuada uma análise computacional através da simulação numérica deste mesmo ensaio. Assim, será possível compreender em que medida análises computacionais estão próximas dos ensaios físicos de resistência ao corte e deslizamento.

Como a rugosidade das descontinuidades se desenvolve por processos naturais, as irregularidades presentes nas superfícies das mesmas apresentam as mais variadas formas. Neste estudo foi efetuada uma abordagem às descontinuidades com geometria dente de serra, no entanto, existem mais geometrias que podem ser desenvolvidas e estudadas recorrendo à modelação numérica. Assim, sugere-se que seja efetuado um estudo computacional para diferentes geometrias regulares ou irregulares.

### AGRADECIMENTO:

Este trabalho inclui pesquisas realizadas com o apoio financeiro da FCT, através do projeto PTDC/ECM EST\_1691/2012 - Caracterização Experimental e Numérica do Comportamento Estrutural de Pontes em Arco de Tráfego Ferroviário - Aplicação a Pontes Existentes em Portugal.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, Izabel Christina Duarte, and Eduardo Antonio Gomes Marques. 2002. "Introdução à Mecânica das Rochas." *Cadernos Didáticos* 85.
- Barton, and Bandis. 1982. "Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock—23rd US symp. on rock mechanics."
- Barton, N., and V. Choubey. 1977. "The shear strength of rock joints in theory and practice." *Rock mechanics* 10 (1-2):1-54. doi: 10.1007/BF01261801.
- Brady, B. H. G., and E. T. Brown. 2004. *Rock mechanics for underground mining*. Vol. 3rd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Bray, John W, and E Hoek. 1981. *Rock slope engineering*: Taylor & Francis.
- Budi, G, KUM Rao, and Debasis Deb. 2014. "Laboratory modelling of rock joints under shear and constant normal loading." *International Journal of Research in Engineering and Technology* 3 (4):190-200.
- Coutinho, Ricardo Daniel Gomes Vieira. 2009. *Simulação numérica de ensaios de corte e deslizamento em juntas rochosas*. Porto: [s. n.].
- Dumbliauskaite, M. 2006. "Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique de discontinuités d'échantillons rocheux, FEUP/ENPC."
- Eberhardt, E. 2012. "The Hoek-Brown Failure Criterion." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45 (6):981-988. doi: 10.1007/s00603-012-0276-4.
- Fortunato, Eduardo Manuel Cabrita. 1994. *Escavações escoradas em maciços argilosos moles - uma contribuição para o seu dimensionamento*. Porto: [s. n.].
- González de Vallejo, Luis I. 2002. *Ingeniería geológica*. Madrid [etc.]: Prentice Hall.
- Goodman, Richard E. 1989. "Introduction to rock mechanics."
- Grasselli, G, J Wirth, and P Egger. 2002. "Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39 (6):789-800.
- Hoek, E., and E. T. Brown. 1997. "Practical estimates of rock mass strength." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34 (8):1165-1186. doi: 10.1016/s0148-9062(97)00305-7.
- Hoek, Evert. 2000. *Practical rock engineering*. Rocscience.
- Hoek, Evert, and John Bray. 1999. *Rock slope engineering*. Vol. 3rd ed. rev. London New York: E & FN Spon.
- Hudson, John A., and John P. Harrison. 2007. *Engineering rock mechanics an introduction to the principles*. Amsterdam: Pergamon.
- ISRM. 1974a. "Suggested Methods for In Situ Determination of Direct Shear Strength."
- ISRM. 1974b. "Suggested Methods for Laboratory Determination of Direct Shear Strength."
- ISRM. 1977. "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses." *ISRM, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 15 (6).

- Khosravi, Ali, Mohammad H Sadaghiani, Mohammad Khosravi, and Christopher L Meehan. 2013. "The Effect of Asperity Inclination and Orientation on the Shear Behavior of Rock Joints." *Geotechnical Testing Journal* 36 (3).
- Leite, E. 2004. Estudo do Comportamento Geomecânico do Pilar Superior da Mina Ipueira V (Ferbasa Mineração–Andorinha, BA). Mestrado em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.
- Menezes, J. 2006. "Um protótipo para ensaios de corte e deslizamento de juntas." 10º Congresso Nacional de Geotecnia, Campus de Campolide da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Neyra, Arturo Fausto Maldonado. 2006. "Caracterização das estruturas geológicas e estimativa da resistência ao cisalhamento das descontinuidades na mineração de cobre de Tintaya, Perú." INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS.
- Patton, F. D. 1966. "Multiple Modes of Shear Failure In Rock." 1966/1/1/.
- Pereira, Joaquim Jorge da Costa Paulino. 1994. *O comportamento mecânico das descontinuidades em maciços rochosos*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Ross-Brown, Dermot M, and Geoffrey Walton. 1975. "A portable shear box for testing rock joints." *Rock mechanics* 7 (3):129-153.



## **ANEXOS**



## ANEXO I

### JUNTA LISA – SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE

Tabela I.1 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=0,1$  MPa.

Carga distribuída horizontal (KPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (KPa)	Deslocamento horizontal (mm)
0	0	0,000
10	3,5	0,000
20	7	0,014
30	10,5	0,028
40	14	0,042
50	17,5	0,056
60	21	0,070
70	24,5	0,084
80	28	0,098
90	31,5	0,112
100	35	0,126
110	38,5	0,141
120	42	0,155
130	45,5	0,169
140	49	0,183
150	52,5	0,197
160	56	0,211
165	57,75	0,231
170	59,5	1,647

Tabela I.2 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=0,2$  MPa.

Carga distribuída horizontal (kPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (kPa)	Deslocamento horizontal (mm)
0	0	0,000
20	7	0,029
40	14	0,057
60	21	0,085
80	28	0,113
100	35	0,141
120	42	0,169
140	49	0,197
160	56	0,225
180	63	0,254
200	70	0,282
220	77	0,310
240	84	0,338
260	91	0,366
280	98	0,395
300	105	0,423
320	112	0,451
330	115,5	0,490
340	119	14,874

Tabela I.3 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=0.5$  MPa.

Carga distribuída horizontal (KPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (KPa)	Deslocamento horizontal (mm)
0	0	0,003
50	17,5	0,073
100	35	0,143
150	52,5	0,213
200	70	0,284
250	87,5	0,354
300	105	0,424
350	122,5	0,495
400	140	0,565
450	157,5	0,636
500	175	0,706
550	192,5	0,777
600	210	0,847
650	227,5	0,918
700	245	0,988
750	262,5	1,059
800	280	1,130
820	287	1,158
830	290,5	26,479

Tabela I.4 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=1$  MPa.

Carga distribuída horizontal (KPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (KPa)	Deslocamento horizontal (mm)
0	0	0,592
200	70	0,873
400	140	1,154
600	210	1,436
800	280	1,717
1000	350	2,000
1100	385	2,141
1200	420	2,283
1300	455	2,424
1350	472,5	2,502
1400	490	2,594
1450	507,5	2,695
1500	525	2,804
1550	542,5	2,923
1600	560	3,050
1620	567	3,104
1640	574	3,164
1650	577,5	5,738
1660	581	70,959

Tabela I.5 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=2$  MPa.

Carga distribuída horizontal (KPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (KPa)	Deslocamento horizontal (mm)
0	0	0,643
400	140	1,205
800	280	1,766
1200	420	2,329
1400	490	2,612
1600	560	2,902
1800	630	3,184
2000	700	3,468
2200	770	3,753
2400	840	4,043
2600	910	4,325
2800	980	4,607
3000	1050	4,918
3100	1085	5,115
3150	1102,5	5,224
3200	1120	5,336
3250	1137,5	5,464
3300	1155	8,815
3350	1172,5	263,537

Tabela I.6 - Resultados da simulação do ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=4$  MPa.

Carga distribuída horizontal (KPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (KPa)	Deslocamento horizontal (mm)
0	0	4,828
500	0,175	5,535
1000	0,35	6,239
1500	0,525	6,942
2000	0,7	7,645
2500	0,875	8,348
3000	1,05	9,102
3500	1,225	9,806
4000	1,4	10,510
4500	1,575	11,243
5000	1,75	12,235
5200	1,82	13,462
5400	1,89	14,747
5600	1,96	15,294
5800	2,03	15,599
6000	2,1	15,879
6200	2,17	16,174
6400	2,24	19,412
6600	2,31	655,740



## ANEXO II

### JUNTA COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO PERPENDICULAR AO PLANO DE CORTE

Tabela II.1 - Valores de SRF para  $\sigma_n=0,1$  MPa e  $T=0,3$ MPa para juntas definidas por coordenadas geométricas.

		Número de saliências			
		n=10	n=8	n=6	n=4
Inclinação das saliências (graus)	i=5	0,65	0,65	0,65	0,65
	i=10	0,78	0,78	0,78	0,78
	i=15	0,94	0,94	0,94	0,94
	i=20	1,16	1,16	1,16	1,16

Tabela II.2 - Valores de SRF para  $\sigma_n=0,1$  MPa e  $T=0,3$ MPa para juntas definidas pela interseção de duas famílias de descontinuidades.

		Número de saliências			
		n=10	n=8	n=6	n=4
Inclinação das saliências (graus)	i=5	0,65	0,65	0,65	0,65
	i=10	0,78	0,78	0,78	0,78
	i=15	0,94	0,94	0,94	0,97
	i=20	1,16	1,16	1,16	1,16

Tabela II.3 - Valores de SRF para  $\sigma_n=0,1$  MPa e  $T=0,3$ MPa para juntas com translação de  $\Delta/2$  (juntas simétricas).

		Número de saliências			
		n=10	n=8	n=6	n=4
Inclinação das saliências (graus)	i=5	0,66	0,66	0,66	0,66
	i=10	0,8	0,8	0,8	0,79
	i=15	0,97	0,97	0,97	0,95
	i=20	1,16	1,17	1,18	1,17

Tabela II.4 - Valores de tensão tangencial para a situação limite de rotura para as juntas com  $i=20^\circ$ .

Tensão normal, $\sigma_n$ (Mpa)	1ª recta do critério de Patton, $\tau$ (MPa)	2ª recta do critério de Patton, $\tau$ (MPa)	n=20		n=10		n=8		n=6		n=4	
			Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)1	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)
0	0,00	0,61	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,25	0,30	0,76	0,9	0,3	0,9	0,3	0,9	0,3	0,9	0,3	0,9	0,3
0,5	0,60	0,90	1,7	0,6	1,7	0,6	1,7	0,6	1,7	0,6	1,7	0,6
0,75	0,89	1,05	2,6	0,9	2,6	0,9	2,6	0,9	2,6	0,9	2,6	0,9
1	1,19	1,19	3,4	1,2	3,4	1,2	3,4	1,2	3,4	1,2	3,4	1,2
1,25	1,49	1,33	4,0	1,4	4,2	1,5	4,2	1,5	4,2	1,5	4,2	1,5
1,5	1,79	1,48	4,4	1,5	4,8	1,7	4,9	1,7	4,8	1,7	4,9	1,7
1,75	2,09	1,62	4,9	1,7	5,4	1,9	5,4	1,9	5,4	1,9	5,5	1,9
2	2,38	1,77	5,3	1,8	5,9	2,1	5,9	2,1	6,0	2,1	6,1	2,1
2,25	2,68	1,91	5,7	2,0	6,4	2,2	6,5	2,3	6,5	2,3	6,7	2,3
2,5	2,98	2,06	6,2	2,2	6,9	2,4	7,0	2,5	7,0	2,5	7,2	2,5
2,75	3,28	2,20	6,5	2,3	7,4	2,6	7,5	2,6	7,5	2,6	7,8	2,7
3	3,58	2,34	6,9	2,4	7,9	2,7	8,0	2,8	8,1	2,8	8,3	2,9
3,25	3,87	2,49	7,3	2,6	8,5	3,0	8,5	3,0	8,5	3,0	8,8	3,1
3,5	4,17	2,63	8,1	2,8	8,8	3,1	8,9	3,1	9,0	3,2	9,3	3,3
3,75	4,47	2,78	8,9	3,1	9,4	3,3	9,3	3,3	9,5	3,3	9,8	3,4
4	4,77	2,92	9,1	3,2	9,8	3,4	9,8	3,4	9,8	3,4	10,2	3,6
4,25	5,06	3,07	9,5	3,3	10,2	3,6	10,1	3,5	10,4	3,6	10,7	3,7
4,5	5,36	3,21	9,9	3,4	10,5	3,7	10,5	3,7	10,8	3,8	11,1	3,9
4,75	5,66	3,36	10,1	3,5	10,7	3,7	10,7	3,7	11,2	3,9	11,5	4,0
5	5,96	3,50	10,4	3,6	11,5	4,0	10,9	3,8	11,7	4,1	12,0	4,2
5,25	6,26	3,64	10,8	3,8	11,9	4,2	12,0	4,2	12,0	4,2	12,4	4,3
5,5	6,55	3,79	11,3	4,0	12,4	4,3	12,5	4,4	12,6	4,4	12,8	4,5
5,75	6,85	3,93	11,5	4,0	12,7	4,4	13,0	4,5	12,9	4,5	13,2	4,6
6	7,15	4,08	11,9	4,2	13,1	4,6	13,5	4,7	13,5	4,7	13,6	4,8



Tabela II.5- Valores de tensão tangencial para a situação limite de rotura para as juntas com  $i=15^\circ$ .

Tensão normal, $\sigma_n$ (Mpa)	1ª recta do critério de Patton, $\tau$ (MPa)	2ª recta do critério de Patton, $\tau$ (MPa)	n=20		n=10		n=8		n=6		n=4	
			Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)1	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)
0,00	0,00	0,63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,25	0,25	0,78	0,7	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3
0,50	0,50	0,92	1,4	0,5	1,4	0,5	1,4	0,5	1,4	0,5	1,4	0,5
0,75	0,75	1,07	2,1	0,8	2,1	0,8	2,1	0,8	2,1	0,8	2,1	0,8
1,00	1,00	1,21	2,9	1,0	2,9	1,0	2,9	1,0	2,9	1,0	2,9	1,0
1,25	1,25	1,36	3,6	1,2	3,6	1,2	3,6	1,2	3,6	1,2	3,6	1,2
1,50	1,50	1,50	4,3	1,5	4,3	1,5	4,3	1,5	4,3	1,5	4,3	1,5
1,75	1,75	1,64	4,9	1,7	4,9	1,7	4,9	1,7	4,9	1,7	4,9	1,7
2,00	2,00	1,79	5,5	1,9	5,5	1,9	5,5	1,9	5,5	1,9	5,6	2,0
2,25	2,25	1,93	5,9	2,1	6,0	2,1	6,2	2,2	6,0	2,1	6,2	2,2
2,50	2,50	2,08	6,4	2,2	6,5	2,3	6,8	2,4	6,5	2,3	6,7	2,3
2,75	2,75	2,22	6,5	2,3	6,9	2,4	7,2	2,5	7,2	2,5	7,0	2,4
3,00	3,00	2,37	6,9	2,4	6,9	2,4	7,6	2,7	7,7	2,7	7,8	2,7
3,25	3,25	2,51	7,2	2,5	7,1	2,5	8,0	2,8	8,3	2,9	8,0	2,8
3,50	3,50	2,65	7,4	2,6	7,5	2,6	8,3	2,9	8,8	3,1	8,9	3,1
3,75	3,75	2,80	7,6	2,7	8,2	2,9	8,6	3,0	9,3	3,3	9,3	3,3
4,00	4,00	2,94	7,9	2,8	8,7	3,1	9,0	3,1	9,8	3,4	9,9	3,5
4,25	4,25	3,09	9,0	3,2	9,1	3,2	9,1	3,2	10,4	3,6	10,0	3,5
4,50	4,50	3,23	9,9	3,5	10,0	3,5	9,6	3,3	10,8	3,8	10,5	3,7
4,75	4,75	3,38	10,6	3,7	10,6	3,7	10,5	3,7	11,0	3,9	11,0	3,9
5,00	5,00	3,52	11,3	4,0	11,4	4,0	11,2	3,9	11,3	4,0	11,5	4,0
5,25	5,25	3,67	11,7	4,1	11,7	4,1	11,5	4,0	11,3	4,0	12,0	4,2
5,50	5,50	3,81	12,3	4,3	12,3	4,3	12,3	4,3	12,4	4,3	12,6	4,4
5,75	5,75	3,95	12,6	4,4	12,6	4,4	12,5	4,4	12,6	4,4	13,0	4,6
6,00	6,00	4,10	13,0	4,6	13,0	4,6	13,2	4,6	13,2	4,6	13,5	4,7

Tabela II.6 - Valores de tensão tangencial para a situação limite de rotura para as juntas com  $i=10^\circ$ .

Tensão normal, $\sigma_n$ (Mpa)	1ª recta do critério de Patton, $\tau$ (MPa)	2ª recta do critério de Patton, $\tau$ (MPa)	n=20		n=10		n=8		n=6		n=4	
			Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)1	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)1	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)
0,00	0,00	0,59	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,25	0,21	0,73	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2
0,50	0,42	0,88	1,2	0,4	1,2	0,4	1,2	0,4	1,2	0,4	1,2	0,4
0,75	0,63	1,02	1,8	0,6	1,8	0,6	1,8	0,6	1,8	0,6	1,8	0,6
1,00	0,84	1,17	2,4	0,8	2,4	0,8	2,4	0,8	2,4	0,8	2,4	0,8
1,25	1,05	1,31	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0
1,50	1,26	1,46	3,6	1,3	3,6	1,3	3,6	1,3	3,6	1,3	3,6	1,3
1,75	1,47	1,60	4,2	1,5	4,2	1,5	4,2	1,5	4,2	1,5	4,2	1,5
2,00	1,68	1,74	4,8	1,7	4,8	1,7	4,8	1,7	4,8	1,7	4,8	1,7
2,25	1,89	1,89	5,4	1,9	5,4	1,9	5,4	1,9	5,4	1,9	5,4	1,9
2,50	2,10	2,03	5,7	2,0	5,9	2,1	5,9	2,1	5,8	2,0	5,9	2,1
2,75	2,31	2,18	6,4	2,2	6,4	2,2	6,5	2,3	6,4	2,2	6,5	2,3
3,00	2,52	2,32	6,9	2,4	7,0	2,5	7,0	2,5	7,0	2,5	7,1	2,5
3,25	2,73	2,47	7,4	2,6	7,8	2,7	7,7	2,7	7,6	2,7	7,6	2,7
3,50	2,94	2,61	7,9	2,8	8,4	2,9	8,3	2,9	8,3	2,9	8,2	2,9
3,75	3,15	2,76	8,3	2,9	8,9	3,1	8,8	3,1	8,8	3,1	8,5	3,0
4,00	3,36	2,90	8,5	3,0	9,4	3,3	9,3	3,3	9,3	3,3	9,3	3,3
4,25	3,57	3,04	9,0	3,2	9,9	3,5	9,8	3,4	9,8	3,4	9,8	3,4
4,50	3,78	3,19	9,2	3,2	10,1	3,5	10,2	3,6	10,0	3,5	10,3	3,6
4,75	3,99	3,33	10,0	3,5	10,7	3,7	10,6	3,7	10,5	3,7	10,7	3,7
5,00	4,20	3,48	10,2	3,6	10,6	3,7	10,7	3,7	10,7	3,7	11,1	3,9
5,25	4,41	3,62	10,6	3,7	11,5	4,0	11,5	4,0	11,3	4,0	11,5	4,0
5,50	4,62	3,77	11,0	3,9	12,0	4,2	11,7	4,1	11,7	4,1	11,3	4,0
5,75	4,82	3,91	11,5	4,0	12,5	4,4	12,0	4,2	12,0	4,2	11,5	4,0
6,00	5,03	4,05	12,0	4,2	13,0	4,6	12,2	4,3	12,3	4,3	11,6	4,0

Tabela II. 7 Valores de tensão tangencial para a situação limite de rotura para as juntas com i=5.

Tensão normal, $\sigma_n$ (Mpa)	1ª recta do critério de Patton, $\tau$ (MPa)	2ª recta do critério de Patton, $\tau$ (MPa)	n=20		n=10		n=8		n=6		n=4	
			Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)1	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)	Carga horizontal T para SRF=1 (MPa)1	$\tau$ para SRF=1 (Mpa)
0	0	0,43	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,25	0,175052	0,574338	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2
0,5	0,350104	0,718675	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4
0,75	0,525156	0,863013	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5
1	0,700208	1,00735	2,0	0,7	2,0	0,7	2,0	0,7	2,0	0,7	2,0	0,7
1,25	0,875259	1,151688	2,5	0,9	2,5	0,9	2,5	0,9	2,5	0,9	2,5	0,9
1,5	1,050311	1,296025	3,0	1,1	3,0	1,1	3,0	1,1	3,0	1,1	3,0	1,1
1,75	1,225363	1,440363	3,5	1,2	3,5	1,2	3,5	1,2	3,5	1,2	3,5	1,2
2	1,400415	1,584701	4,0	1,4	4,0	1,4	4,0	1,4	4,0	1,4	4,0	1,4
2,25	1,575467	1,729038	4,5	1,6	4,5	1,6	4,5	1,6	4,5	1,6	4,5	1,6
2,5	1,750519	1,873376	5,0	1,8	5,0	1,8	5,0	1,8	5,0	1,8	5,0	1,8
2,75	1,925571	2,017713	5,5	1,9	5,5	1,9	5,5	1,9	5,5	1,9	5,5	1,9
3	2,100623	2,162051	6,0	2,1	6,0	2,1	6,0	2,1	6,0	2,1	6,0	2,1
3,25	2,275674	2,306388	6,5	2,3	6,5	2,3	6,5	2,3	6,5	2,3	6,5	2,3
3,5	2,450726	2,450726	7,0	2,5	7,0	2,5	7,0	2,5	7,0	2,4	7,0	2,4
3,75	2,625778	2,595064	7,5	2,6	7,5	2,6	7,4	2,6	7,3	2,5	7,5	2,6
4	2,80083	2,739401	8,0	2,8	7,9	2,8	7,9	2,8	7,7	2,7	7,7	2,7
4,25	2,975882	2,883739	8,4	2,9	8,4	2,9	8,3	2,9	8,2	2,9	8,1	2,8
4,5	3,150934	3,028076	8,8	3,1	8,8	3,1	8,7	3,0	8,5	3,0	8,4	2,9
4,75	3,325986	3,172414	9,4	3,3	9,3	3,3	9,2	3,2	8,9	3,1	8,7	3,0
5	3,501038	3,316751	9,7	3,4	9,7	3,4	9,5	3,3	9,2	3,2	9,9	3,5
5,25	3,67609	3,461089	10,0	3,5	10,1	3,5	9,8	3,4	9,7	3,4	10,3	3,6
5,5	3,851141	3,605426	10,5	3,7	10,5	3,7	10,3	3,6	10,8	3,8	10,8	3,8
5,75	4,026193	3,749764	10,6	3,7	10,8	3,8	10,6	3,7	11,2	3,9	11,2	3,9
6	4,201245	3,894102	11,2	3,9	11,2	3,9	11,2	3,9	11,6	4,1	11,6	4,1

Tabela II.8 - Ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=0.5$  MPa para junta com  $i=20^\circ$  e  $n=6$  (dilatância).

Carga distribuída horizontal (KPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (KPa)	Deslocamento horizontal do bloco inferior (mm)	Deslocamento vertical do bloco superior (mm)
100	35	0,120791	1,002317
200	70	0,240344	1,002384
300	105	0,359538	1,002417
400	140	0,478104	1,002248
500	175	0,634491	1,010226
600	210	0,884028	1,038242
700	245	1,133838	1,066276
800	280	1,38389	1,094337
900	315	1,634393	1,122446
1000	350	1,889825	1,15139
1100	385	2,145767	1,180434
1200	420	2,400781	1,209264
1300	455	2,656153	1,238111
1400	490	2,916301	1,267676
1500	525	3,167674	1,29592
1600	560	3,43629	1,326553
1700	595	4,152877	1,218676
1800	630	223,1826	78,39498
1900	665	305,0007	108,0993

Tabela II.9 - Ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=2$  MPa para junta com  $i=20^\circ$  e  $n=6$  (corte e dilatância).

Carga distribuída horizontal (KPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (KPa)	Deslocamento horizontal do bloco inferior (mm)	Deslocamento vertical do bloco superior (mm)
1000	350	1,418	4,047222
2000	700	2,806	4,091563
3000	1050	5,383	4,393921
4000	1400	8,046	4,715805
5100	1785	10,955	5,061135
5200	1820	11,290	5,108669
5300	1855	11,568	5,143214
5400	1890	11,826	5,173039
5500	1925	12,095	5,204965
5600	1960	12,372	5,23859
5700	1995	12,692	5,279313
5800	2030	12,966	5,311204
5900	2065	13,388	5,358633
6000	2100	13,690	5,390511
6100	2135	16,627	5,373718
6200	2170	18,694	5,312982
6300	2205	21,189	5,214593
6400	2240	24,208	5,068385
6500	2275	24,675	5,072007
6600	2310	29,298	4,773447
6700	2345	34,980	4,322453
6800	2380	42,138	3,61448
6820	2387	80,598	5,66726

## ANEXO III

### JUNTA COM RUGOSIDADE COM ORIENTAÇÃO OBLÍQUA AO PLANO DE CORTE

Tabela III.1 - Valores de SRF obtidos para diferentes orientações das asperezas para  $\sigma_n=0.1$  MPa e  $T=0.3$  MPa.

		Ângulo de orientação das Asperezas, $\theta$					
		$\theta=0^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$
Inclinação das saliências (graus)	i=5	0,65	0,65	0,64	0,64	0,62	0,61
	i=10	0,78	0,77	0,76	0,74	0,72	0,69
	i=15	0,94	0,93	0,91	0,87	0,83	0,77
	i=20	1,16	1,15	1,1	1,04	0,96	0,88

Tabela III.2 - Ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=0.5$  MPa para junta com  $i=20^\circ$  e  $n=6$  para os diferentes valores de  $\theta$ .

Carga distribuída horizontal (KPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (KPa)	Deslocamento horizontal do bloco inferior (mm)					
		$\Theta=0^\circ$	$\Theta=10^\circ$	$\Theta=20^\circ$	$\Theta=30^\circ$	$\Theta=40^\circ$	$\Theta=50^\circ$
100	35	0,121	0,117	0,105	0,116	0,107	0,124
200	70	0,239	0,237	0,226	0,24	0,234	0,255
300	105	0,358	0,357	0,348	0,363	0,361	0,386
400	140	0,477	0,476	0,469	0,487	0,488	0,517
500	175	0,632	0,624	0,594	0,611	0,615	0,648
600	210	0,882	0,872	0,835	0,856	0,819	0,831
700	245	1,132	1,12	1,076	1,111	1,07	1,106
800	280	1,382	1,368	1,317	1,366	1,322	1,381
900	315	1,632	1,616	1,559	1,622	1,574	1,656
1000	350	1,882	1,865	1,8	1,881	1,826	1,932
1100	385	2,133	2,116	2,044	2,147	2,082	2,554
1200	420	2,383	2,369	2,293	2,405	2,346	3,538
1300	455	2,639	2,622	2,536	2,674	3,005	4,524
1400	490	2,896	2,874	2,787	3,091	3,705	218,748
1500	525	3,148	3,129	3,047	3,643	164,607	340,582
1600	560	3,409	3,392	3,492	146,966	372,254	553,847
1700	595	4,171	48,724	211,026	312,754	407,033	605,503
1800	630	224,208	256,352	322,458	478,512	526,763	843,15
1900	665	298,958	409,932	416,251	553,995	662,926	884,512

Tabela III.3 - Ensaio de resistência ao corte para  $\sigma_n=2$  MPa para junta com  $i=20^\circ$  e  $n=6$  para os diferentes valores de  $\theta$ .

Carga distribuída horizontal (KPa)	Tensão tangencial, $\tau$ (KPa)	Deslocamento horizontal do bloco inferior (mm)					
		$\Theta=0^\circ$	$\Theta=10^\circ$	$\Theta=20^\circ$	$\Theta=30^\circ$	$\Theta=40^\circ$	$\Theta=50^\circ$
500	175	1,003	0,935	0,744	0,957	0,799	0,988
1000	350	1,595	1,53	1,347	1,572	1,43	1,638
1500	525	2,188	2,127	1,955	2,189	2,074	2,291
2000	700	2,944	2,849	2,587	2,848	2,716	2,953
2500	875	4,193	4,088	3,783	4,059	3,781	3,978
3000	1050	5,446	5,364	5,001	5,375	5,04	5,354
3500	1225	6,739	6,637	6,247	6,697	6,349	6,771
4000	1400	8,043	7,911	7,497	8,047	7,671	8,221
4250	1487,5	8,694	8,568	8,142	8,733	8,34	9,484
4500	1575	9,341	9,21	8,782	9,409	9,045	11,755
4750	1662,5	9,979	9,865	9,424	10,107	9,807	14,188
5000	1750	10,651	10,507	10,078	10,798	11,346	16,712
5250	1837,5	11,287	11,163	10,752	11,533	12,939	19,541
5500	1925	12,021	11,858	11,42	13,317	15,299	940,906
5750	2012,5	13,684	14,209	137,51	16,088	21,246	3192,956
6000	2100	15,883	16,888	17,012	22,271	1174,713	6479,623
6250	2187,5	18,067	21,42	22,016	132,991	3724,229	9680,278
6500	2275	24,549	28,391	30,013	1917,244	7406,135	13780,84
6750	2362,5	35,748	87,093	1056,54	5157,366	11850,09	17618,42